

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Frau  
**Karolin Pansa**

**Test eines kommerziellen  
Antischallsystems**

**Mittweida, 2012**



Fakultät:  
**Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik**

---

## **DIPLOMARBEIT**

---

# **Test eines kommerziellen Antischallsystems**

Autorin:  
**Karolin Pansa**

Studiengang:  
Umwelttechnik

Seminargruppe:  
Ut06wU1

Erstprüfer:  
Prof. Dr. Hübelt

Zweitprüfer:  
Dr. Schulz

Einreichung:  
18.04.2012



---

## **Bibliografische Angaben**

Pansa, Karolin: Test eines kommerziellen Antischallsystems; 58 Seiten, 26 Abbildungen, 6 Anlage, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik

Diplomarbeit, 2012

## **Referat**

In dieser Arbeit soll die Funktionsweise eines kommerziellen Antischallsystems untersucht werden. Das Antischallsystem wird ursprünglich als ein Aktiv-Modul in einem Abgasschalldämpfer eingesetzt. Zunächst findet eine messtechnische Ermittlung der Schalldruckpegelminderung bei Aktivierung des Antischallsystems in seinem originalen Anwendungsfall statt. Anschließend wird das Antischallsystem an einer Modelllärmschutzwand erprobt. Dabei wird das Antischallsystem im Kronenaufsatz einer Modelllärmschutzwand eingebaut. Das Ziel dieser Erprobung ist die Wirkung des Antischallsystems auf die Einfügungsdämpfung der aktiven Lärmschutzwand zu untersuchen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>0 Übersicht .....</b>	<b>1</b>
0.1 Motivation .....	1
0.2 Aufgabenstellung .....	2
0.3 Zielsetzung.....	2
0.4 Kapitelübersicht .....	2
<b>1 Funktionsüberprüfung des aktiven Abgasschalldämpfers .....</b>	<b>5</b>
1.1 Schalldämpfer mit integrierten aktiven Komponenten.....	5
1.1.1 Schalldämpfer.....	5
1.1.2 Schalldämpfer mit aktiven Komponenten .....	7
1.1.3 Die Schalldämpfung eines Absorptionsschalldämpfers .....	8
1.2 Messung des aktiven Abgasschalldämpfers am Rohr zum Nachweis der Dämpfung .....	10
1.2.1 Messaufbau und Ablauf der Messung.....	10
1.2.2 Messergebnisse.....	11
<b>2 Schallausbreitung an einer Lärmschutzwand.....</b>	<b>15</b>
2.1 Die Kennwerte eines Schallschirmes .....	15
2.2 Berechnungsverfahren zur Pegelminderung durch Abschirmung im Freien.....	17
<b>3 Vergleich von Forschungsarbeiten an aktiven Lärmschutzwänden.....</b>	<b>21</b>
3.1 Ziel, Prinzipien und Untersuchungsgegenstand der Forschungsarbeiten .. .....	24
3.2 Bedingungen.....	26
3.2.1 Raumbedingungen .....	26
3.2.2 Aufbau der Lärmschutzwand .....	27
3.2.3 Versuchsaufbau.....	29
3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	33

<b>4</b>	<b>Verbesserung der Einfügungsdämpfung einer Lärmschutzwand durch ein integriertes Active Noise Control System .....</b>	<b>39</b>
4.1	Physikalische Beschreibung der Beugung von Schall an einer schallweichen Schallschirmkrone .....	39
4.1.1	Wellentheoretische Beschreibung des Schallfeldes hinter einem zylindrischen Schallschirmaufsatz.....	39
4.1.2	Wellentheoretische Beschreibung des Schallfeldes an einem aktiv zylindrischen Schallschirmaufsatz.....	42
4.2	Verifizierung der Position des Fehlermikrofons am Aufsatz einer Modelllärmschutzwand .....	44
<b>5</b>	<b>Aktive Modelllärmschutzwand unter Nutzung kommerziell erhältlicher ANC-Systeme .....</b>	<b>53</b>
5.1	Messaufbau und Ablauf der Messung .....	53
5.2	Messergebnisse .....	54
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>57</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>XVII</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>XXXIII</b>



## Abkürzungsverzeichnis

ALSW	Aktive-Lärmschutzwand
ANC	Active Noise Control
ASD	Abgasschalldämpfer
FS	Fehlersensoren
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
LSW	Lärmschutzwand
MF	Messmikrofon
Psq	Primärschallquelle
Ssq	Sekundärschallquelle



## Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$\Delta L_{L,M}$	dB	Schalldruckpegeldifferenz (ein- und ausgeschaltetes Aktiv-Modul)
$A$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche
$a$	m	Weg Schallquelle – Schirmkrone
$a_Q$	m	Entfernung zur Quelle
$b$	m	Weg Schirmkrone – Immisionspunkt
$b_A$	m	Radius des Aufatzes
$c$	m	Weg Schallquelle – Immisionspunkt
$c_0$	m/s	Schallgeschwindigkeit
$c_F$	N/m	Federkonstante
$d$	m	Kanaldurchmesser
$D_{Aktiv}$	dB	Dämpfung bei aktiviertem Aktiv-Modul
$D_e$	dB	Einfügungsdämpfung
$D_{e,imm}$	dB	Einfügungsdämpfung am Immisionsort
$D_{e,S}$	dB	Einfügungsdämpfungsmaß des Schallschirms
$D_L$	dB	Kanaldämpfung
$D_Z$	dB	Abschirmmaß
$e$	m	Dicke des Schallschirmes; Weg Schirmkrone 1 zu Schirmkrone 2
$E$	-	Empfängerpunkt
$f$	Hz	Frequenz
$f_S$	Hz	Durchstrahlfrequenz
$h$	m	Höhe

---

$h_{eff}$	m	effektive Höhe eines Schallschirmes
$L$	m	Kanallänge
$l$	m	Länge
$L_{eq}$	dB	energieäquivalenter Schalldruckpegel
$L_{L,M(OFF)}$	dB	gemittelter Schalldruckpegel bei ausgeschaltetem Aktiv-Modul
$L_{L,M(ON)}$	dB	gemittelter Schalldruckpegel bei eingeschaltetem Aktiv-Modul
$L_{OFF}$	dB	Schalldruckpegel an Immissionsort bei ausgeschalteten ANC-System
$L_{ON}$	dB	Schalldruckpegel an Immissionsort bei angeschalteten ANC-Systemen
$M$	kg	Masse im Feder-Masse-System
$N$	-	Fresnel-Zahl
$n$	-	Anzahl Schallstrahlen
$p(r,\varphi)$	Pa	Schalldruck an zylindrischen Schallschirmkrone
$P_a$	W	absorbierte Schallleistung
$p_{akt}$	Pa	Schalldruck durch Wirkung der Sekundärschallquelle
$P_e$	W	eintretende Schalleistung
$p_{ges}$	Pa	Schalldruck an zylindrisch aktiven Schallschirmkrone
$p_{Schirm}$	Pa	Schallschirmwirkung
$p_{Zyl}$	Pa	Zylinderwirkung
$r$	m	Radius
$S$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche
$U$	m	Kanalumfang
$V$	m <sup>3</sup>	Luftvolumen
$VM$	dB	Verbesserungsmaß/ Extra-Einfügungsdämpfung/ Mehr-Dämpfung
$z$	m	Schirmwert

---

$Z$	Ns/m <sup>3</sup>	Impedanz
$\alpha$	-	Absorptionsgrad
$\alpha_j$	-	komplexer Steuerfaktor der sekundären Schallquelle
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\varphi$	°	Winkel zum Aufpunkt des Schirmes
$\varphi_0$	°	Schalleinfallswinkel
$\varphi_A$	°	Öffnungswinkel zur sekundären Schallquelle
$\varphi_M$	°	Winkel von der Mitte der Sekundärquelle zum Schirm



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Helmholtzresonators [Quelle:HENN08 S.307].....	6
Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines $\lambda/4$ -Resonators in Form eines „Tannenbaums“. 1 Kanalwand, 2 Wellenleiter, 3 Absorberfüllung, 4 Blechgehäuse .....	6
Abbildung 3: Vergleich der charakteristischen Dämpfungskurven von Schalldämpfern gleicher geometrischen Abmessungen. a Absorptionsschalldämpfer ( Dämpfungsmechanismus: Reibung), b Relaxationsschalldämpfer (Dämpfungsmechanismus: Reibung-Volumen), c Resonanzschalldämpfer (Dämpfungsmechanismus: Masse-Reibung-Volumen) [Quelle: SCHIRMER06 S.252].....	7
Abbildung 4: Erläuterung zu den Baugrößen eines zylinderförmigen Absorptionsschalldämpfer .....	9
Abbildung 5: grafischer Mess- und Versuchsaufbau.....	11
Abbildung 6: Messaufbau .....	11
Abbildung 7: Schalldruckpegeldifferenz: $\Delta L_{L,M} = L_{L,M(off)} - L_{L,M(on)}$ am Messmikrofon 1 und Messmikrofon 2 .....	12
Abbildung 8: Berechnung des Schirmwertes $z$ bei Einfachbeugung an der Schirmkrone; S: Sender/ Schallquelle; R: Empfänger/ Immissionspunkt [Quelle: DIN9613 S.9].....	16
Abbildung 9: Berechnung des Schirmwertes $z$ bei Doppelbeugung an einem dickem Schallschirm (1.) oder an zwei dünnen Schallschirmen (2.); S: Sender/Schallquelle; R: Empfänger/ Immissionsort [Quelle: DIN 9613 S.9].....	16
Abbildung 10: Maekawa-Chart: Pegelminderung gegenüber freier Schallausbreitung als Funktion der Fresnel-Zahl $N$ für ein senkrecht zur Verbindungslinie Schallquelle-Immissionsort langes Hindernis [Quelle: MUELLER04 S.97].....	18
Abbildung 11: Überblick über die Entwicklung der Forschung an aktiven Lärmschutzwänden .....	22
Abbildung 12: Parameter und Begriffe.....	23
Abbildung 13: Position der sekundären Schallquellen und die sich daraus ergebenden Messebenen.....	33

Abbildung 14: Geometrische Größen am halbunendlichen Schirm mit der Oberflächenimpedanz $Z$ . $a_Q$ , $\varphi_0$ : Koordinaten der Quelle, $r$ , $\varphi$ : Koordinaten des Aufpunktes, $b_A$ : Zylinderradius und dem Beugungswinkel $\beta = \varphi - \pi - \varphi_0$ [Quelle: MOESER95, S. 569] .....	40
Abbildung 15: Modellanordnung eines Schallschirmes mit aktiv zylindrischem Aufsatz zur Berechnung des Schallfeldes. $a_Q$ : Entfernung zur Quelle, $b_A$ : Radius des Aufsatzes, $r$ : Radius zum Aufpunkt, $\beta$ : Beugungswinkel, $\varphi_0$ : Schalleinfallswinkel, $\varphi$ : Winkel des Aufpunktes zum Schirm, $\varphi_A$ : Öffnungswinkel zur sekundären Quelle, $\varphi_M$ : Winkel von der Mitte der sekundären Quelle zum Schirm [Quelle: KOH04 S.23] .....	43
Abbildung 16: Versuchsaufbau der Modelllärmschutzwand.....	44
Abbildung 17: Messaufbau der Modelllärmschutzwand [Quelle: SCHUBERT11 S.62] .....	44
Abbildung 18: Verlauf des Schalldruckpegels an den Messmikrofonen und am Fehlermikrofon während der Phasenänderung des sekundären Schallsignals; $f = 500$ Hz .....	46
Abbildung 19: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals; $f = 500$ Hz .....	47
Abbildung 20: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals; $f = 250$ Hz .....	48
Abbildung 21: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals; $f = 125$ Hz .....	49
Abbildung 22: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1, $f = 125$ Hz .....	50
Abbildung 23: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1, $f = 250$ Hz .....	51
Abbildung 24: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1, $f = 500$ Hz .....	51
Abbildung 25: Draufsicht auf Schallschirmaufsatz mit den drei Aktiv-Modulen und der Anordnung der Sekundärschallquellen und Fehlermikrofonen (links); Seitenansicht des Messaufbaus (rechts) .....	54
Abbildung 26: Frequenzverlauf des Verbesserungsmaßes an Messmikrofonen 1 und 2 .....	55



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der Einfügungsdämpfungen $D_e$ (angegeben durch den Hersteller) mit der Summe aus der analytisch ermittelten Kanaldämpfung $D_L$ und der gemessenen Mehr-Dämpfung durch das eingeschaltete Aktiv-Modul. Die Dämpfungsdifferenz ergibt sich aus: $\Delta D (D_{L(\text{berechnet})} + D_{\text{Aktiv}})$ .....	13
Tabelle 2:	Raumbedingungen der Forschungsarbeiten.....	27
Tabelle 3:	Aufbau und Dimensionen der Modelllärmschutzwand/Lärmschutzwand .....	28



## 0 Übersicht

Das einleitende Kapitel soll die Aufgaben- und Zielstellung sowie die Motivation in dieser Abschlussarbeit darstellen. Des Weiteren wird ein Überblick über die Kapitel gegeben.

### 0.1 Motivation

Der Straßenverkehr ist eine dominierende Quelle für Lärmbelastung. Die fortwährende Zunahme des Verkehrsaufkommens in unserer bevölkerungsdichten und modernen Industriegesellschaft stellt ein Lärmproblem dar. So führen einerseits die erhöhte Frequentierung der Transportwege und andererseits das veränderte Freizeit- und Mobilitätsverhalten der Bevölkerung zu einem steigenden Aufkommen von Straßenverkehrslärm. Laut dem Verkehrsclub Deutschland fühlen sich über 60% der Deutschen durch Straßenlärm belastigt. Somit ist der Straßenverkehr eine Hauptursache der Lärmbelastung. Es gibt unterschiedliche Ansätze dieser Lärmbelastung entgegenzuwirken. Grundsätzlich kann man zwischen aktiven und passiven Schallschutz unterscheiden. Dabei umfasst der aktive Lärmschutz alle Maßnahmen, die zu einer Verminderung des Schalls an der Quelle oder auf dem Ausbreitungsweg führen. Der passive Lärmschutz beinhaltet bauliche Maßnahmen zum Schutz an den Immissionsorten, zum Beispiel Schallschutzfenster [BMVBS]. Die Benutzung einer konventionellen Lärmschutzwand ist in den aktiven Lärmschutz einzuordnen. Mit Hilfe dieser Maßnahme können Lärmmininderungen bis zu 20 dB erreicht werden. Jedoch ist die Wirkungsweise von einigen Faktoren abhängig. Ein bedeutender Einflussfaktor auf die Wirkung der Lärmschutzeinrichtung ist das Frequenzspektrum des Schalls. Liegen die Geräuschteile des Schalls im tieffrequenten Bereich, lässt die Wirkung des Schallschirms nach. Dies lässt sich mit dem Schallausbreitungsphänomen der Schallbeugung begründen. Die Beugungseffekte treten umso stärker in Erscheinung, je größer das Verhältnis von Wellenlänge zu den Abmessungen des Hindernisses ist [KUENZEL04 S.43]. Das hat zur Folge, dass tiefe Frequenzen mit ihren langen Wellenlängen um das Hindernis, in die sogenannte Schattenzone, gebeugt werden. Ein Lösungsansatz, die schlechte Wirkung der Schallschutzwände bei tieffrequenten Geräuschen aufzuheben, ist die Integration von Antischallsystemen an Lärmschutzwänden. Diese, auch Active Noise Control System (ANC-System) genannten, Systeme mindern den Lärm durch die Beeinflussung des Schallfeldes mittels eines sekundären Schallfeldes. Die Wirkung dieses Systems beruht auf der hydrodynamischen Nahfeldwirkung und dem Erzwingen von destruktiver Interferenz.

## **0.2 Aufgabenstellung**

In dieser Arbeit soll die Funktionsweise eines kommerziellen Antischallsystems untersucht werden. Das Antischallsystem wird ursprünglich als ein Aktiv-Modul in einem Abgasschalldämpfer (ASD) eingesetzt. Zunächst findet eine messtechnische Ermittlung der Schalldruckpegelminderung bei Aktivierung des Antischallsystems in seinem originalen Anwendungsfall statt. Anschließend wird das Antischallsystem an einer Modelllärmschutzwand erprobt.

## **0.3 Zielsetzung**

Der Einsatz von Antischallsystemen an Lärmschutzwänden wurde in der Vergangenheit häufig in Forschungsarbeiten aufgegriffen. Die Integration von ANC-Systemen in Lärmschutzsysteme für geschlossene Kanal- und Leitungssysteme hat sich schon bewährt, sodass Antischallsysteme bereits in Schalldämpfer für Lüftungs- und Klimaanlage kommerziell eingebaut werden. Diese Arbeit soll die Möglichkeit klären, ob ein solches Antischallsystem, welches sich in der technischen Anwendung bei Schallschutzmaßnahmen durchgesetzt hat, in seiner Verwendung zu verändern ist. Es soll ein kommerzielles ANC-System in eine Lärmschutzwand eingebaut und die Wirkung des ANC-Systems auf die Einfügungsdämpfung der aktiven Lärmschutzwand untersucht werden. Dabei soll hinsichtlich der tiefen Frequenzen ein besonderer Untersuchungsschwerpunkt liegen.

## **0.4 Kapitelübersicht**

Die Arbeit umfasst sieben Kapitel. Das erste Kapitel stellt die Untersuchungen des Antischallsystems in seiner eigentlichen Anwendung dar. Dabei wird auf die Funktion des Abgasschalldämpfers und seiner integrierten Aktiv-Komponente (ANC) eingegangen. Anschließend wird die Messung zur Funktionsüberprüfung des Aktiv-Moduls vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird die Theorie zur Schallausbreitung an Lärmschutzwänden dargestellt, wobei der Schwerpunkt auf die ingenieurtechnische Beschreibung gesetzt wird. Einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zum Thema aktive Lärmschutzwände zeigt das dritte Kapitel auf, in dem bedeutende wissenschaftliche Arbeiten dargestellt werden. Das vierte Kapitel gibt einen Einblick in die physikalische Beschreibung der Beugung von Schall an Lärmschutzwandkronen mit integrierten Sekundärschallquellen. Es wird eine Messung vorgestellt, die Nachweis erbringen soll, dass die Einfügungsdämpfung einer Modelllärmschutzwand unter der Benutzung eines ANC-Systems erhöht werden kann.

Es wird in dieser Messung auf ein ANC-System zurückgegriffen, welches für die Forschungsarbeit „Minderung des Verkehrslärms durch den Einsatz aktiver Lärmschutzwände für Anwendung im Straßen- und Schienenverkehr“ [SCHUBERT11] zum Einsatz kam. Das anschließende Kapitel befasst sich mit der Untersuchung der mittels des kommerziellen Antischallsystems aktiv betriebenen Modelllärmschutzwand. Eine Zusammenfassung der Untersuchungen wird im abschließenden Kapitel der Diplomarbeit gegeben.



# **1 Funktionsüberprüfung des aktiven Abgasschalldämpfers**

Die Wirksamkeit des Antischallsystems wird in der ursprünglichen Anwendung getestet. Dabei wird ein Aktiv-Modul seitlich auf den Abgasschalldämpfer aufgesetzt. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen zu Schalldämpfern mit aktiven Komponenten erläutert, während im zweiten Teil die Untersuchungen des aktiven Abgasschalldämpfers vorgestellt werden.

## **1.1 Schalldämpfer mit integrierten aktiven Komponenten**

Schalldämpfer sind Schallschutzeinrichtungen, die ein durch sie hindurchtransportiertes Schallfeld abschwächen. Die Abschwächung erfolgt auf dem Ausbreitungspfad des Schalls durch den Schalldämpfer.

### **1.1.1 Schalldämpfer**

Grundsätzlich wird zwischen dem Reflexionsschalldämpfer, Absorptionsschalldämpfer, Relaxationsschalldämpfer und dem Resonanzschalldämpfer unterschieden. Die Wirkung des Reflexionsschalldämpfers beruht ausschließlich auf Reflexionen des Schalls an sogenannten Prallwänden und plötzlich erweiterten oder verringerten Querschnitten. Schalldämpfer, deren Kanalwandungen aus Absorptionsmaterial bestehen, nennt man Absorptionsschalldämpfer. Auf Grund von Reibungsvorgängen in den Poren des schallabsorbierenden Materials beruht der Dämpfungsmechanismus dieser Schalldämpfer auf der Umwandlung der Schwingenergie in Wärmeenergie. Eine spezielle Art des Absorptionsschalldämpfers ist der Relaxationsschalldämpfer. Der Relaxationsschalldämpfer besteht aus einer dünnen homogenen Absorptionsschicht, hinter der sich ein kassetiertes Luftvolumen befindet. Ausgleichsvorgänge zwischen den schwingenden Mediumsteilchen im Kanal und im kassetierten Luftvolumen hinter dem konzentrierten Strömungswiderstand führen zur Reibung der Moleküle beim Durchtritt in ein Volumenelement. Dies führt zu einer Verringerung der Schallenergie [SCHIRMER06 S. 250]. Bei dem Resonanzschalldämpfer wird durch die Anregung eines Feder-Masse-Systems eine Resonanz erzeugt. Die Dämpfungswirkung beruht auf der dadurch auftretenden inneren Dissipation an den Schwingern im Resonanzfall. Es wird zwischen Loch- und Plattenresonatoren unterschieden. Bei letzteren wird eine dünne, biegeeweiche und luftundurchlässige Platte vor das Absorptionsmaterial oder vor

einem abgeschlossenen Luftraum angebracht. Bei der Resonanzfrequenz des schwingungsfähigen Systems wird die Platte zu starken Resonanzschwingungen angeregt. Es erfolgt eine Verringerung der Schallenergie. Ist die Platte mit einer Lochung versehen so handelt es sich um einen Lochresonator. Dem Lochresonator liegt das Prinzip eines Helmholtzresonators zugrunde, einem Masse-Feder-System. Die Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Helmholtzresonators. Das Luftvolumen im Loch mit dem Querschnitt  $A$  und der Länge  $l$  wirkt als Masse  $M$ . Die Feder des Resonators mit der Federkonstante  $c_F$  ist dem Luftvolumen  $V$  zuzuordnen. Eine Schallenergieverringern erfolgt durch Reibungseffekte in den Löchern.

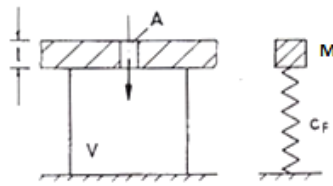


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Helmholtzresonators [Quelle: HENN08 S.307]

Um die Resonanzschalldämpferarten zu komplettieren, ist der  $\lambda/4$ -Resonator zu erwähnen. Der prinzipielle Aufbau eines  $\lambda/4$ -Resonator-Schalldämpfers in Form eines „Tannenbaums“ ist in der Abbildung 2 dargestellt. Die geneigten Seitenkammern stellen Wellenleiter dar. Beträgt die Länge der Seitenkammer einem Viertel der Wellenlänge, tritt Resonanz auf.



Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines  $\lambda/4$ -Resonators in Form eines „Tannenbaums“. 1 Kanalwand, 2 Wellenleiter, 3 Absorberfüllung, 4 Blechgehäuse [Quelle: SCHIRMER06 S.252]

Der optimale Wirkungsbereich von Resonanzschalldämpfern liegt im Bereich der Resonanzfrequenz. Indem Absorptionsmaterial hinter den Platten eingesetzt wird, kann der schmalbandigen Wirkung entgegengewirkt werden. Besonders für die Dämpfung von tiefen Frequenzen werden Resonanzschalldämpfer eingesetzt. [HENN08 S.304-306] [MOESER07 S.273-274] [SCHIRMER06 250-253]



In Abbildung 3 sind die charakteristischen Dämpfungskurven der in dieser Arbeit vorgestellten Schalldämpfer (Absorptions-, Relaxations-, Resonanzschalldämpfer) dargestellt. Die grafische Darstellung verdeutlicht die Wirkung der Schalldämpfer über den Frequenzbereich.

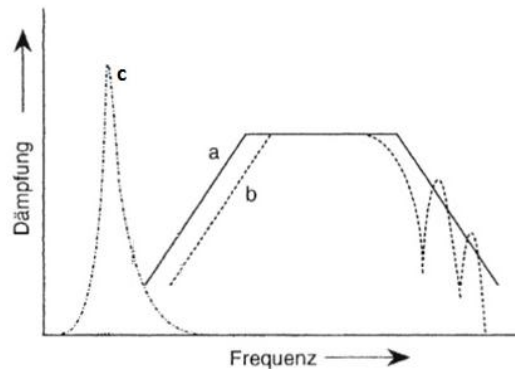


Abbildung 3: Vergleich der charakteristischen Dämpfungskurven von Schalldämpfern gleicher geometrischen Abmessungen. a Absorptionsschalldämpfer (Dämpfungsmechanismus: Reibung), b Relaxationsschalldämpfer (Dämpfungsmechanismus: Reibung-Volumen), c Resonanzschalldämpfer (Dämpfungsmechanismus: Masse-Reibung-Volumen) [Quelle: SCHIRMER06 S.252]

Der in dieser Arbeit verwendete Abgasschalldämpfer ist ein poröser Faserabsorber (Absorptionsschalldämpfer). Die Dämpfung des porösen Faserabsorbers wird mittels eines im 90°-Winkel abstehenden Aktiv-Moduls, erhöht.

In den folgenden Abschnitten wird zum einen auf Absorber mit integrierten aktiven Komponenten und zum anderen auf eine Möglichkeit der Berechnung der Dämpfung eines Absorptionsschalldämpfers eingegangen.

### 1.1.2 Schalldämpfer mit aktiven Komponenten

Die Wirksamkeit von Schalldämpfern mit aktiven Komponenten basiert auf der Integration elektromechanischer oder elektroakustischer Wandler. Lautsprecher, Mikrofon und Signalverarbeitung sind die Bestandteile dieser aktiven Komponenten, den Antischallsystemen.

Antischallsysteme beruhen auf dem Prinzip der Schallauslöschung durch destruktive Interferenz. Es wird eine Schalldruckpegelminimierung durch die Überlagerung des Störsignals (Primärschall) mit einem zweiten Signal (Sekundärschall/Antischall), welches die gleiche Frequenz und Amplitude besitzt, aber um 180° phasenverschoben ist, erreicht. Das Mikrofon nimmt den Schalldruck des Primärsignals auf und die Signalverarbeitungseinheit generiert ein Antischallsignal. Dieses wird über einem Verstärker an den Lautsprecher gegeben.

Diese aktive Komponenten (Lautsprecher, Mikrofon und Signalverarbeitung) werden in einem kompakten Gehäuse, einem sogenannten Aktiv-Modul, seitlich auf den Schalldämpfer aufgesetzt. Die Lautsprechermembran und das Volumen des Gehäuses bilden einen Resonator (Helmholzresonator), sodass im deaktivierten Zustand eine Dämpfung im Bereich der Resonanzfrequenz auftritt. Die elektroakustische Aktivierung führt zu einer Erhöhung der Absorptionswirkung des Feder-Masse-Systems. Mittels eines in unmittelbarer Nähe der Lautsprechermembran angebrachten Mikrofons, wird der Schalldruck vor der Membran erfasst. Das Mikrofon ist durch einen elektroakustischen Übertragungsfaktor charakterisiert. Die Mikrofonspannung wird über die Signalverarbeitungseinheit an den Verstärker gegeben, welcher an den Lautsprecher gekoppelt ist. Die Lautsprechermembran wird zu einem stärkeren Nachgeben gezwungen. Der Druck im Gehäuse (Hohlkammer) erhöht sich, während sich der Druck an der Trennfläche zum Kanal verringert und die Dämpfungswirkung erheblich ansteigt [FIB], [FUCHS07 S.88-95].

### 1.1.3 Die Schalldämpfung eines Absorptionsschalldämpfers

Eine Möglichkeit die Schalldämpfung eines Absorptionsschalldämpfers zu berechnen, bietet sich durch die Anwendung der Näherungsformel nach Piening.

#### Näherungsformel nach Piening

Die Näherungsformel nach Piening beruht auf folgender Annahme:

$$\frac{P_a}{P_e} \sim \frac{UL}{S} \sim D_L \quad (1.1)$$

mit  $P_a$ ..... absorbierte Schallleistung

$P_e$ ..... eintretende Schallleistung

$D_L$  ..... Kanaldämpfung

Die Größen  $U$ ,  $L$ ,  $S$  und  $r$  sind wie folgt definiert:

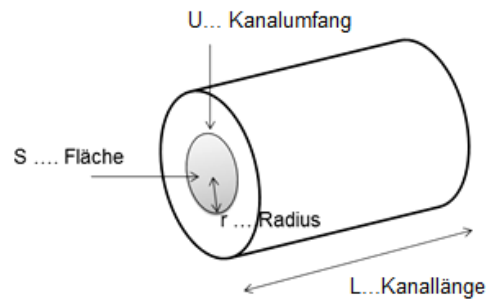


Abbildung 4: Erläuterung zu den Baugrößen eines zylinderförmigen Absorptionsschalldämpfers

$$UL = 2\pi rL \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Fläche des Kanals, über die Schallenergie austritt})$$

$$S = \pi r^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Fläche in der Schallenergie eintritt})$$

Die Annahme (1.1) kann auch durch:

$$D_L = k \frac{\alpha UL}{S} \text{ [dB]} \quad (1.2)$$

mit  $\alpha$  ..... Absorptionsgrad

beschrieben werden. Mit der experimentell ermittelten Konstante  $k = 1,5$  ist es möglich, die Dämpfung eines beliebig langen Kanals der Länge  $L$  nach Gleichung (1.2) zu berechnen. Im Falle  $2r > \lambda$  kommt es zum Durchstrahleffekt. Der Durchstrahleffekt führt zum Abfall der Dämpfung. Die Erweiterung der Gleichung (1.2) durch den Faktor  $f_s/f$  berücksichtigt den Durchstrahleffekt. Somit gilt für die Ermittlung der Kanaldämpfung, oberhalb der Durchstrahlfrequenz  $f_s$ :

$$D_L = 1,5\alpha \frac{UL}{S} \left(\frac{f_s}{f}\right)^2 \text{ [dB]} \quad (1.3)$$

$$\text{mit} \quad f_s = 1,5 \frac{c_0}{2d} \text{ [Hz]}$$

(1.4)

mit  $d$  ..... Kanaldurchmesser

mit  $c_0 = 344 \frac{m}{s}$

## 1.2 Messung des aktiven Abgasschalldämpfers am Rohr zum Nachweis der Dämpfung

Die Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen Dämpfungsmaße eines Schalldämpfers werden durch die DIN EN ISO 7235 „Labormessungen an Schalldämpfern in Kanälen-Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust“ festgelegt. Diese Messung dient nicht zur genauen Bestimmung des Einfügungsdämpfungsmaßes des Abgasschalldämpfers, sondern es soll lediglich die Funktion der Dämpfung des integrierten Aktiv-Resonators nachgewiesen werden. Deswegen kommt die oben genannte Messvorschrift nicht zur Anwendung.

Um jedoch die Messergebnisse einordnen zu können, findet ein Vergleich zwischen den theoretisch berechneten und messtechnischen Ergebnissen, sowie den Angaben des Abgasschalldämpfer-Herstellers statt.

### 1.2.1 Messaufbau und Ablauf der Messung

Der zu untersuchende Abgasschalldämpfer wurde an einen Messkanal angeschlossen. Als Messkanal diente ein Kanalgrundrohr (KG-Rohr). Die in der Praxis zu mindernden Abgasgeräusche wurden in dem Versuch durch einen Lautsprecher (Psq), der von einem Rauschgenerator und einem Verstärker betrieben wurde, ersetzt. Die Messungen wurden in Terzbändern durchgeführt. Zwei Messmikrofone wurden angebracht. Das Messmikrofon (MF 1) wurde unterhalb des Aktiv-Resonators positioniert. Auf diese Weise sollte der Einfluss des sekundären Schallfeldes, welches durch den Lautsprecher abgestrahlt wird, untersucht werden. Die Anbringung des Messmikrofons (MF 2) erfolgte im KG-Rohr, hinter dem Abgasschalldämpfer. In den Abbildung 5 und 6 sind der Mess- und Versuchsaufbau dargestellt. Das verwendete Equipment für die Messung ist aus dem Anhang A-1 zu entnehmen. Mittels einer keilförmigen Absorptionsauskleidung am Ende des KG-Rohrs wurde die Möglichkeit auftretender Resonanzen im Messkanal verhindert. Eine Messreihe beinhaltete zwei Messungen zu einer Messzeit von jeweils  $t = 10$  s. Die erste Messung wurde mit eingeschaltetem Aktiv-Modul (ON) durchgeführt. In der darauffolgenden zweiten Messung wurde der Aktiv-Resonator ausgeschaltet (OFF). Insgesamt wurden zehn Messreihen aufgenommen.

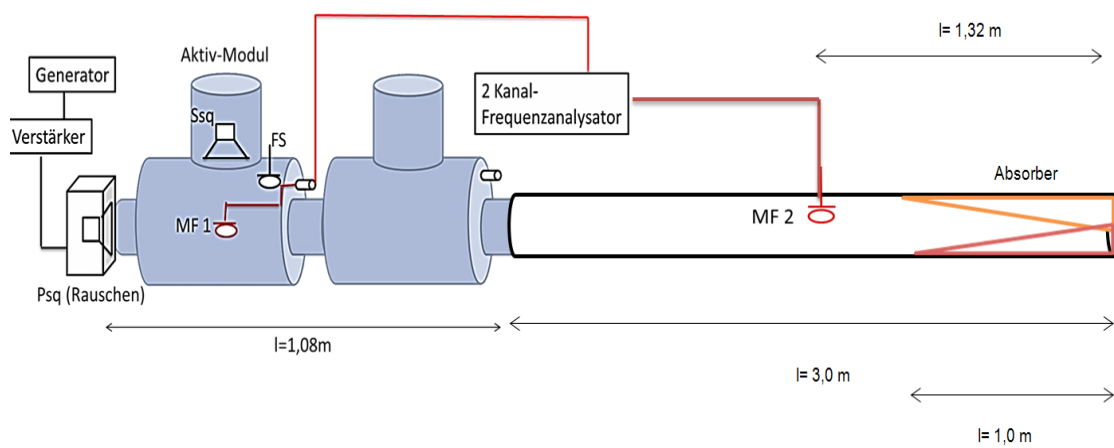


Abbildung 5: grafischer Mess- und Versuchsaufbau



Abbildung 6: Messaufbau

## 1.2.2 Messergebnisse

Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse, die Aufschluss über die Dämpfungswirkung des Aktiv-Resonators geben, vorgestellt. Der Vergleich der Messergebnisse mit theoretisch ermittelten Kanaldämpfungen wird im zweiten Teil dargestellt.

### Messergebnisse der Dämpfungsfunktion des Aktiv-Resonators

Die Ergebnisse der Dämpfungsfunktion sind in der Abbildung 7 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Schalldruckpegeldifferenz  $\Delta L_{L,M}$ . Die Differenzbildung erfolgte durch Subtraktion des energetisch gemittelten Schalldruckpegels aus der Messung mit eingeschaltetem Aktiv-Modul  $L_{L,M(on)}$  von dem energetisch gemittelten Schalldruckpegel bei ausgeschaltetem Aktiv-Modul  $L_{L,M(off)}$ :  $\Delta L_{L,M} = L_{L,M(off)} - L_{L,M(on)}$  [dB]. Demzufolge weisen positive Schalldruckpegeldifferenzen daraufhin, dass bei eingeschaltetem Aktiv-Modul der Schalldruckpegel sinkt.

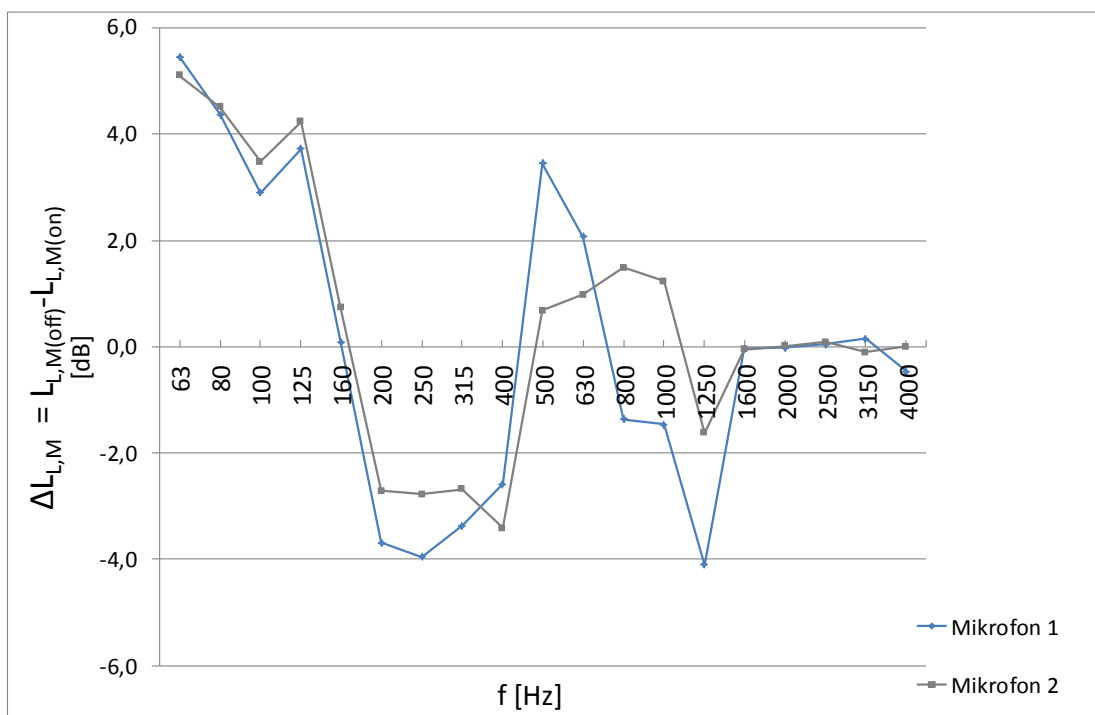


Abbildung 7: Schalldruckpegeldifferenz:  $\Delta L_{L,M} = L_{L,M(off)} - L_{L,M(on)}$  am Messmikrofon 1 und Messmikrofon 2

Mit Hilfe des Aktiv-Moduls im ON-Betrieb konnte die Dämpfung des Abgasschalldämpfers im Frequenzbereich  $f = 63 \dots 160$  Hz und bei den Frequenzen  $f = 500$  Hz,  $f = 630$  Hz erhöht werden.

Die negativen Schalldruckpegeldifferenzen zwischen  $f = 160$  Hz und  $f = 400$  Hz sowie um  $f = 1250$  Hz belegen, dass der Schalldruckpegel bei eingeschalteten Aktiv-Resonator gestiegen ist. Aktiv-Resonatoren werden für die Dämpfung von tiefen Frequenzen eingesetzt. Das vorliegende Messergebnis bestätigt diesen Einsatzbereich. Denn oberhalb einer Frequenz von  $f = 1600$  Hz zeigt das Aktiv-Modul keine Wirkung.

### Vergleich der Messergebnisse mit theoretisch ermittelten Kanaldämpfungen $D_L$ des Abgasschalldämpfers und Herstellerangaben zum Abgasschalldämpfer

Die Berechnung der Kanaldämpfung wurde mit der Näherungsformel (1.2) und (1.3) nach Piening durchgeführt. Dem Anhang A-2 sind die Dimensionen des Abgasschalldämpfers zu entnehmen, die für die Berechnung notwendig sind. Es wird von einer Schallgeschwindigkeit von  $c_0 = 344 \text{ m/s}$  ausgegangen. In der Tabelle 1 werden die berechneten Kanaldämpfungen dargestellt. Der Durchstrahleffekt stellt sich laut der Gleichung (1.4) bei einer Frequenz von  $f = 1612 \text{ Hz}$  ein. Bei Anwendung der Näherungsformel nach Piening wird nur die Dämpfungswirkung des porösen Faserabsorbers berücksichtigt. Um die vom Hersteller angegebenen Einfügungsdämpfungen  $D_e$  mit den Berechnungen vergleichen zu können, wurde die Summe aus den theoretisch ermittelten Kanaldämpfungen  $D_L$  und der, bei eingeschaltetem Aktiv-Modul gemessenen „Mehr-Dämpfung“ ( $D_{\text{Aktiv}}$  entspricht  $\Delta L_{L,M} \text{ Mikrofon 2}$ ) gebildet.

Tabelle 1: Vergleich der Einfügungsdämpfungen  $D_e$  (angegeben durch den Hersteller) mit der Summe aus der analytisch ermittelten Kanaldämpfung  $D_L$  und der gemessenen Mehr-Dämpfung durch das eingeschaltete Aktiv-Modul. Die Dämpfungsdifferenz ergibt sich aus:  $\Delta D (D_e - (D_L(\text{berechnet}) + D_{\text{Aktiv}}))$ .

f [Hz]	$\alpha$	$D_L$ (berechnet) [dB]	$D_{\text{Aktiv}}$ (gemessen) [dB]	$D_e$ (Hersteller) [dB]	$D_L + D_{\text{Aktiv}}$ [dB]	$\Delta D$ [dB]
125	0,4	5,4	4,2	11,7	9,6	2,1
250	0,58	7,8	-2,8	9,6	5,0	4,6
500	0,6	8,1	0,7	8,6	8,8	-0,2
1000	0,7	9,5	1,2	15,6	10,7	5,0
2000	0,75	6,6	0	14,2	6,6	7,6
4000	0,65	1,4	0	14,1	1,4	12,7





## 2 Schallausbreitung an einer Lärmschutzwand

Eine Lärmschutzwand ist ein abschirmendes Hindernis, welches die Schallausbreitung beeinflusst und zu einer Verminderung der Schallenergie auf der Schattenseite führt. Nach DIN EN ISO 9613 wird nur dann ein Objekt als abschirmendes Hindernis betrachtet, wenn seine Horizontalabmessungen senkrecht zur Verbindungslinie Emissions-Immissionsort größer ist als die Wellenlänge  $\lambda$  des zu betrachtenden Schalls. Der direkte Ausbreitungsweg des Schalls wird durch diese Art der Lärmschutzvorrichtung verhindert. Der Schall kann nur durch Reflexion, Transmission und Beugung in die Schattenseite der Lärmschutzwand eindringen. Letztere Ausbreitungsmöglichkeit soll in den folgenden Ausführungen erläutert werden.

Das Phänomen der Beugung einer Schallwelle an der Schirmkrone kann ingenieurtechnisch und wellentheoretisch beschrieben werden. Die Beugung mindert die Abschirmwirkung von Lärmschutzwänden.

Das vorliegende Kapitel soll einen kurzen Überblick über die ingenieurtechnischen Beschreibungsmöglichkeiten der Schallbeugung an der Schallschirmkrone geben. Der wellentheoretische Ansatz wird im Kapitel vier vorgestellt.

### 2.1 Die Kennwerte eines Schallschirmes

Die drei Kennwerte eines Schallschirmes sind erstens die effektive Höhe  $h_{eff}$ , die auch als wirksame Höhe des Schallschirmes bezeichnet wird, zweitens der Schirmwert  $z$  und drittens die Fresnel-Zahl  $N$ .

Die wirksame Höhe des Schallschirmes (effektive Höhe  $h_{eff}$ ) ist das Lot von der Schirmkante auf die Strecke Schallquelle-Immissionsort. Der Schirmwert  $z$  beschreibt den Wegunterschied zwischen der direkten Emissions- und Immissionsort-Verbindung und dem durch das Hindernis erzwungenen Umweg. Der Berechnungsansatz des Schirmwertes  $z$  ist vom Schallschirm abhängig. Für die Berechnung des Schirmwertes eines dünnen Schallschirmes ( $e \ll \lambda$ ) an dem der Schall, wie in Abbildung 8 an der Schallschirmkrone eine Einfachbeugung erfährt, ist der Schirmwert  $z$  wie folgt definiert:

$$z = (a + b) - c \quad (2.1a)$$

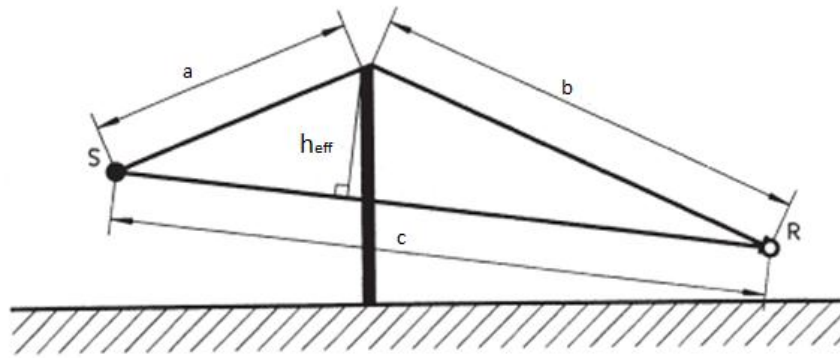


Abbildung 8: Berechnung des Schirmwertes  $z$  bei Einfachbeugung an der Schirmkrone; S: Sender/ Schallquelle; R: Empfänger/ Immissionspunkt [Quelle: DIN9613 S.9]

Trifft der Schall auf einen dicken Schallschirm (Bedingung  $e \ll \lambda$  ist nicht erfüllt) oder auf zwei parallel dünne Schallschirme, so kommt es zu einer Doppelbeugung (Abbildung 9). Die Berechnung des Schirmwertes  $z$  lautet in diesem Fall:

$$z = (a + b + e) - c$$

(2.1b)

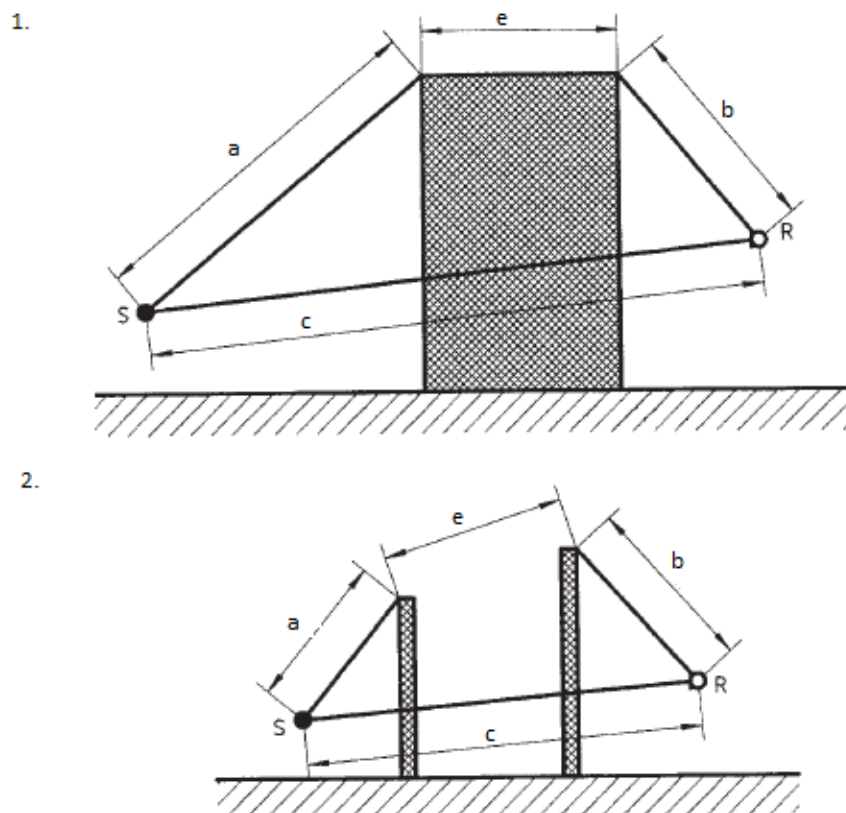


Abbildung 9: Berechnung des Schirmwertes  $z$  bei Doppelbeugung an einem dicken Schallschirm (1.) oder an zwei dünnen Schallschirmen (2.); S: Sender/Schallquelle; R: Empfänger/ Immissionsort [Quelle: DIN 9613 S.9]

Die Fresnel-Zahl  $N$  ist eine für die Beugung charakteristische Größe.

$$N = \pm \frac{2z}{\lambda} = \frac{2zf}{c_0} \quad (2.2)$$

Die Wahl des Vorzeichens ist von der Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger abhängig. Besteht eine Sichtverbindung, so ist ein „-“ zu wählen. Liegt hingegen keine Sichtverbindung zwischen diesen beiden Punkten vor, wird das „+“ eingesetzt [WS Akustik, HS S.64].

Die reine Abschirmwirkung der Schirmkante, ohne dass Rand- und Umgebungsbedingungen beachtet werden, wird durch das Abschirmmaß  $D_z$  beschrieben. Sie fällt daher in der Regel größer aus als das Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{e,S}$ . Das Einfügungsdämpfungsmaß kennzeichnet die Schalldruckpegeldifferenz an einem Immissionspunkt zwischen dem Fall ohne Hindernis und dem Fall mit Hindernis. Dabei werden die Umgebungseinflüsse (Boden, Reflexionen und Streuungen) berücksichtigt.

## 2.2 Berechnungsverfahren zur Pegelminderung durch Abschirmung im Freien

Ein exaktes Berechnungsverfahren zur Beugung einer ebenen Welle an einem Schirm wurde von Sommerfeld, 1896 durchgeführt. Es gibt zahlreiche Vereinfachungen für exakte Lösungsansätze. In der Praxis kommen bevorzugt die Berechnungsverfahren zur Schallabschirmung von Kurze [KURZE71] und Maekawa [MAEKAWA68] zum Einsatz.

Die Grundlage des einfachen Modells von Maekawa [MAEKAWA68] bilden Modellmessungen an einem dünnen Schirm. Diese experimentell gewonnenen Daten wurden mit den nach den Kirchhoffschen Beugungstheorien berechneten Werten verglichen und als approximierte Kurve (Maekawa-Chart) in einem Diagramm über der Fresnel-Zahl eingetragen. Das Diagramm ist in Abbildung 10 dargestellt.

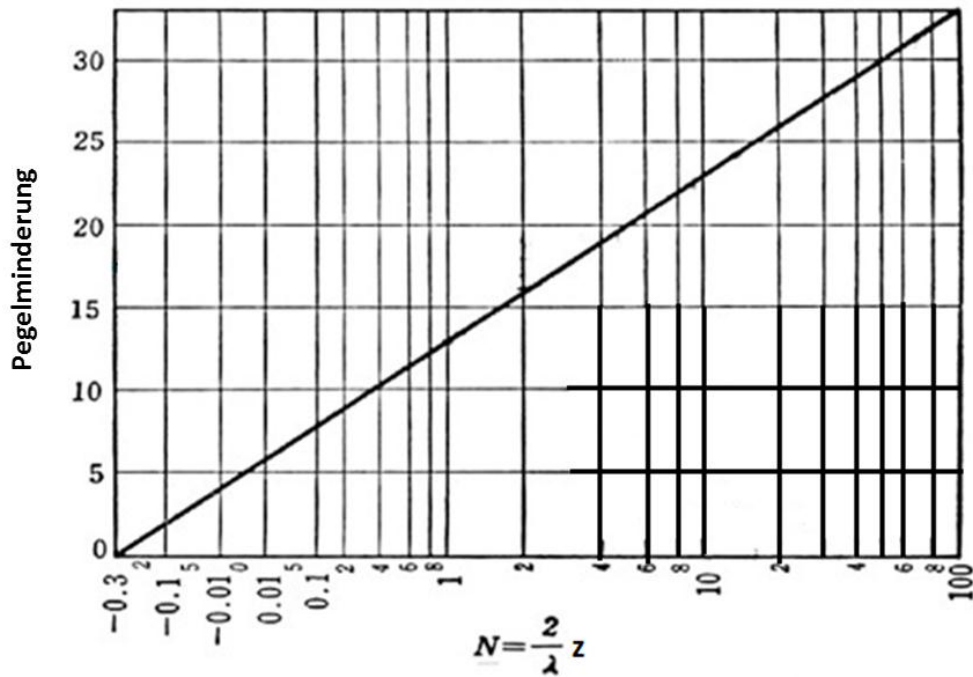


Abbildung 10: Maekawa-Chart: Pegelminderung gegenüber freier Schallausbreitung als Funktion der Fresnel-Zahl  $N$  für ein senkrecht zur Verbindungslinie Schallquelle-Immissionsort langes Hindernis [Quelle: MUELLER04 S.97]

Aus Abbildung 10 ergibt sich folgende Formel für das Abschirmmaß  $D_z$  bei Verwendung eines dünnen Schirmes:

$$D_z = 10 \lg(6N + 1) \text{ dB} + 5 \text{ dB}, \quad N \geq -0,1 \quad (2.3)$$

Die Berechnungsformel des Abschirmmaßes  $D_z$  nach [KURZE71] ist wie folgt definiert:

$$D_z = 20 \lg \left( \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) \text{ dB} + 5 \text{ dB}, \quad N \geq -0,1 \quad (2.4)$$

Die in den Gleichungen (2.3) und (2.4) aufgezeigten Berechnungen des Abschirmmaßes berücksichtigen nur die Beugung an einer Schirmkante. Die Ausbreitung des Schalls von der Quelle zum Immissionspunkt über den Schirm kann aber über mehrere Beugungskanten geschehen (Anhang A-3). Die Beugung des Schalls an mehreren Kanten, wird von Maekawa durch folgende Formel zum Ausdruck gebracht:

$$D_{e,imm} = -10 \log \left( 10^{\frac{D_{z,1}}{10} \text{ dB}} + 10^{\frac{D_{z,2}}{10} \text{ dB}} + \dots + 10^{\frac{D_{z,n}}{10} \text{ dB}} \right) \text{ dB} > 0 \quad (2.5)$$

Die Einfügungsdämpfung am Immissionsort  $D_{e,imm}$  setzt sich somit laut (2.5) aus der energetischen Addition der Pegelminderung der einzelnen Schallstrahlen zusammen. Eventuell auftretende Interferenzen, die auf unterschiedlichen Laufzeiten verursacht durch unterschiedliche Ausbreitungswege des Schalls zurückzuführen sind, werden nicht betrachtet. Dieser Sachverhalt wird in Lams Modell [LAM94] aufgegriffen. Die Summierung des Schalldruckes der einzelnen am Immissionsort eintreffenden Schallstrahlen als Feldgröße berücksichtigt die durch Laufzeitunterschiede bedingten Interferenzen der Schalldruckwerte. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die genaue Beschreibung des Berechnungsmodells verzichtet.

Die folgende Aufzählung soll einen Einblick über Normen und Richtlinien geben, die zur Berechnung der Abschirmwirkung von Schallschirmen herangezogen werden:

- RLS 90 „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen“ [RLS90]
- VDI-Richtlinie 2720 „Schallschutz durch Abschirmung im Freien“ [VDI2720]
- DIN 18005 „Schallschutz im Städtebau“ [DIN18005]
- DIN 9613 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien“ [DIN9613]



### **3 Vergleich von Forschungsarbeiten an aktiven Lärmschutzwänden**

Schallschutzwände verfügen bei tieffrequenten Geräuschen nur über eine geringe Wirkung. Um diese zu erhöhen, bietet sich als Lösungsansatz das Integrieren eines ANC-Systems in die Lärmschutzwand an. 1993 wurde der Ansatz einer verbesserten Wirkung von Schallschutzwänden unter Benutzung aktiver Systeme (ALSW) in einer wissenschaftlichen Arbeit von Omoto [OMOTO93] zum ersten Mal näher untersucht. Seitdem weckte diese Möglichkeit der aktiven Lärmbekämpfung an Lärmschutzwänden internationales Interesse und wurde immer wieder in Forschungsarbeiten aufgegriffen. Abbildung 11 verdeutlicht, dass sich die Forschungsarbeiten grob in drei Entwicklungsstadien einordnen lassen. Während Omoto [OMOTO93] und Duhamel [DUHAMEL97] mit den ersten Versuchen in den 90er Jahren diese Möglichkeit der Verbesserung der Wirkung von Lärmschutzwänden grundsätzlich bestätigten, konkretisierten Shao [SHAO97] und Guo [GUO98] am Ende der 90er ihre wissenschaftlichen Arbeiten hinsichtlich ihrer Untersuchungsgegenstände.

Die in den letzten Jahren durchgeführten Forschungen von Berkhoff [BERKHOFF05], Niu [NIU06], Liu [LIU08] und Tarabini [TARABINI07] konzentrierten sich besonders auf die Standortoptimierung der ANC-System-Bestandteile. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten von Koh [KOH04] und Schubert [SCHUBERT11] wurde auf die Auswirkung einer mittels ANC hergestellten schallweichen Schallschirmkrone auf die Einfügungsdämpfung der Lärmschutzwand gelegt. Dabei wurden unter anderen auch die Positionen der Sekundärschallquelle und des Fehlermikrofons auf der Krone der Lärmschutzwand untersucht. Mittels Experimenten, Simulationen und analytischen Betrachtungen wurde dieser Forschungsansatz in den Arbeiten untersucht.

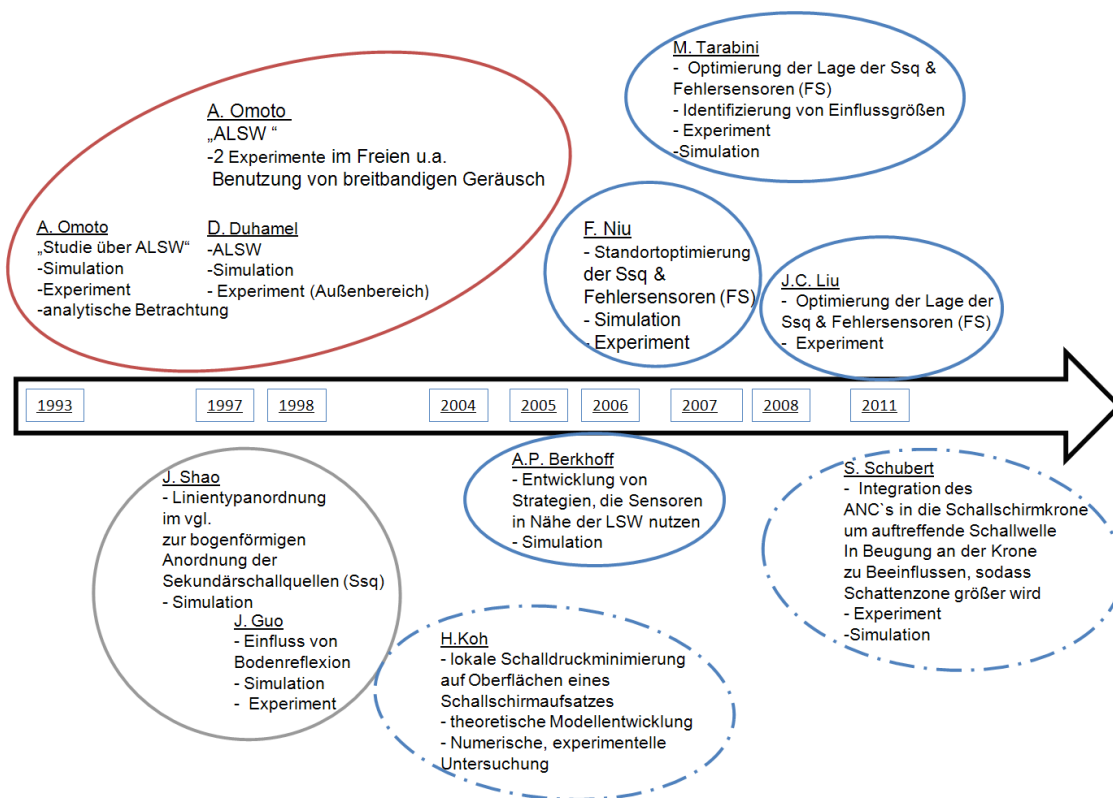


Abbildung 11 Überblick über die Entwicklung der Forschung an aktiven Lärmschutzwänden

Im Folgenden werden die oben genannten wissenschaftlichen Arbeiten im Überblick dargestellt. Dabei werden schwerpunktartig nachstehende Aspekte genauer betrachtet und miteinander verglichen:

- Ziel/Prinzipien und Untersuchungsgegenstände
- Raumbedingungen
- Aufbau der Lärmschutzwand
- Versuchsaufbau
- Ergebnisse

Überwiegend werden die experimentellen Versuche analysiert. Sofern dabei ein Bezug auf die Simulation genommen wird, wird dies mit einem Vermerk erwähnt. Um den Vergleich besser gestalten zu können, wird vorweg eine einheitliche Definition von Parametern und Begriffen vorgenommen. Abbildung 12 stellt diese grafisch dar. Alle angegebenen Koordinaten besitzen ihren Ursprung im Mittelpunkt, der in den Experimenten verwendeten Lärmschutzwände. Dabei gibt die x-Koordinate den Ab-



stand von der Lärmschutzwand, die y-Koordinate die Position entlang der Lärmschutzwand und die z-Koordinate die Höhe des Punktes an. Ist im Vergleich der Forschungsarbeiten die Rede von „Punkten in der Nähe der Lärmschutzwand“ so bedeutet dies einen maximalen Abstand zur Lärmschutzwand von 5 m. Demnach werden Abstände > 5 m als „Punkte in der Ferne“ bezeichnet.

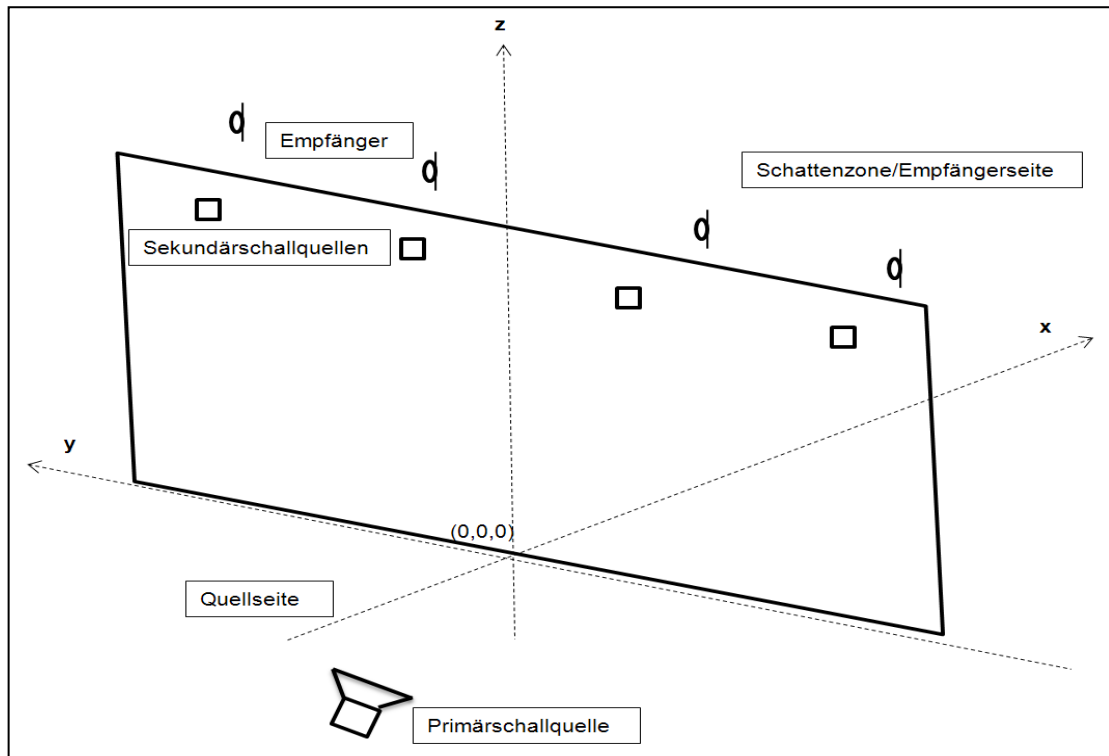


Abbildung 12: Parameter und Begriffe

Um die Wirkung des ANC-Systems an der Lärmschutzwand zu beweisen, wurde in allen Versuchen eine Messung der Mehrdämpfung durchgeführt. Das bedeutet, dass in den Experimenten Messungen des Schalldruckpegels in Empfängerpunkten E mit und ohne Einsatz von ANC-Systemen an der Wand durchgeführt und anschließend die Differenz daraus gebildet wurde. Diese sogenannte Extra-Einfügungsdämpfung ist wie folgt definiert:

$$VM = L_{OFF} - L_{ON} \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

mit  $VM$  ..... Verbesserungsmaß/Extra Einfügungsdämpfung/Mehrdämpfung

$L_{OFF}$  ..... Schalldruckpegel an Immissionsort/Empfänger mit ausgeschaltetem ANC-System

$L_{ON}$  ..... Schalldruckpegel an Immissionsort/Empfänger mit eingeschaltetem ANC-System

### 3.1 Ziel, Prinzipien und Untersuchungsgegenstand der Forschungsarbeiten

Omotos [OMOTO93/97] Forschungsarbeiten über aktiv gesteuerte Lärmschutzwände gehörten unter anderen zu den Vorreitern, Lärmschutzwände mit ANC's auszubauen. Ziel war es die Effektivität der Lärmschutzwand, besonders im tieffrequenten Bereich, zu steigern. Dabei bezieht sich A. Omoto sowohl auf eigene Voruntersuchungen als auch auf die Forschungsarbeit "Basic study on active noise barrier" von S. Ise (1991). In Omotos erster Studie über aktive Lärmschutzwände [OMOTO93] Anfang der 90er Jahre wurde das Thema mittels analytischer Betrachtungen, Simulationen und Experimenten untersucht. Ziel der Untersuchungen sollte die Auslöschung des Schalldruckes an der Beugungskante sein. In den zwei Experimenten der Forschungsarbeit am Ende der 90er Jahre sollte unter anderem durch Nutzung eines breitbandigen Geräusches und der Experimentdurchführung im Freien die Praktikabilität nachgewiesen werden. In [DUHAMEL97] wurden ebenfalls Breitbanduntersuchungen durchgeführt. Sowohl im Experiment (im Außenbereich) als auch in der Simulation wurden die Schalldruckminderung in der Schattenzone, in der sich die Fehlermikrofone befanden, erforscht. In der Studie von D. Duhamel wird unter anderem auch die Frage des Frequenzbereiches, in der eine aktiv gesteuerte Lärmschutzwand Effektivität aufweist, betrachtet. Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit waren darüber hinaus auch der Einfluss der Position und die Anzahl von Sekundärschallquellen (Ssq) sowie der Fehlersensoren (FS). In den anschließenden Forschungsbemühungen wurden die Untersuchungsgegenstände spezieller und dienten nicht nur zum Nachweis einer Mehrdämpfung der Lärmschutzwand unter Nutzung aktiver Systeme. Shao [SHAO97], der Omotos Annahmen und Definitionen übernommen hatte, führte innerhalb seiner Simulation die bogenförmige Anordnung der Ssq ein und verglich diese mit einer Linientypenordnung und den Ergebnissen aus Omotos Versuchen. Der Einfluss von Bodenreflexionen auf die Extra-Einfügungsdämpfung war Untersuchungsschwerpunkt in Guos Arbeit [GUO98]. Die Untersuchung fand mittels Simulationen und Experimenten statt.

Betrachtet wurden folgende vier Bodenbedingungen:

- Boden reflektierend

- Boden nicht reflektierend
- Boden auf Quellseite reflektierend
- Boden auf Empfängerseite reflektierend

Dem Vergleich von Fernfeld-Fehlersignalen, Nahfeld-Fehlersignalen und virtuellen Fernfeld-Fehlersignalen widmete sich Berkhoff [BERKHOF05]. Ziel seiner Simulation war die Entwicklung von Strategien, die Sensoren in Nähe der Lärmschutzwand vorsahen. Der Forschungsschwerpunkt in den Studien der letzten Jahre richtete sich hauptsächlich auf die Positionsoptimierung der Fehlersensoren und der Sekundärschallquellen. Der Abstand zwischen Sekundärschallquelle und den Fehlersensoren wurde durch experimentelle und simulierende Untersuchungen von Niu [NIU06] genauer betrachtet. Dabei wurden auch die folgenden Positionen in den Blick genommen:

- Fehlersensoren zwischen Sekundärschallquelle und Primärschallquelle,
- Fehlersensoren über Sekundärschallquelle,
- Fehlersensoren zwischen Empfänger und Sekundärschallquelle,

Tarabini [TARABINI07] untersuchte ebenfalls die optimale Lage von Sekundärschallquelle und Fehlersensoren. Unter Verwendung eines dezentralen ANC-Systems an einer Einfriedung wurde eine Identifizierung von Einflussgrößen und deren Bewertung auf die Schalldruckreduzierung durchgeführt. In der Studie von Liu [LIU08], die auf Annahmen und Schlussfolgerungen von Niu's Arbeit basiert, wurden drei verschiedene Anordnungen der Sekundärschallquellen untersucht. Eine doppelreihige Ausrichtung bildete die Grundlage für die Untersuchung der drei Systeme. Hinsichtlich des Abstands zur Primärschallquelle wurden diese als:

- Fern-System
- Nah-System und
- Fern-Nah-System definiert (siehe Anhang A-4 14).

Der Schwerpunkt der hauptsächlich theoretischen Arbeit in [KOH04] wurde auf Untersuchungen über die aktive Regelung der Oberflächenimpedanz eines Schirmes gesetzt. Es wurde die Wirkung auf das Schallfeld durch die Schalldruckminimierung auf der Oberfläche des Aufsatzes untersucht. Des Weiteren fand eine Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Schallfeld, sowie die Optimierung dieser für

eine maximale Verbesserung der Abschirmwirkung, statt. Dabei wurde ein theoretisches Modell zur Berechnung des Schallfeldes an aktiven Lärmschutzwänden entwickelt und numerische Untersuchungen durchgeführt. Des Weiteren wurden die analytischen und numerischen Ergebnisse mittels Experimenten überprüft und die Faktoren, die unter praxisnahen Bedingungen das Schallfeld beeinflussen, festgestellt. Im Experiment wurde die aktive Minimierung des Schalldruckes auf der Aufsatzoberfläche durch manuelles Einstellen von Betrag und Phase des sekundären Schallsignals erreicht. Die Regulierung des Sekundärsignals erfolgte solange der zusammengesetzte Schalldruckpegel aus dem primären- und sekundären Schall am Fehlermikrofon ein Minimum erreichte.

Die Forschungsarbeit [SCHUBERT11] beschäftigte sich ebenfalls mit der Positionsoptimierung der ANC-Bestandteile, welche die Wirkung der aktiven Lärmschutzwand beeinflussen. In der Untersuchung wurde das Prinzip der Schalldruckminimierung auf der Oberfläche eines Schallschirmaufsatzes aus [KOH04] aufgenommen und in Simulationen und Experimenten erforscht.

## **3.2 Bedingungen**

Ein Vergleich zwischen den Forschungsarbeiten erfordert eine genauere Betrachtung der vorherrschenden Bedingungen, die bei der Durchführung der Untersuchungen vorlagen. Die zur Recherche stehenden Studien werden unter den Gesichtspunkten der Raumbedingung, der Lärmschutzwand und des Versuchsaufbaues betrachtet. Letzterer Aspekt soll im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen. Nur so wird es abschließend möglich sein die Ergebnisse zu beurteilen und Schlussfolgerungen zu ziehen.

### **3.2.1 Raumbedingungen**

Die Experimente von Omoto [OMOTO97] und D. Duhamel [DUHAMEL97] Ende der 90er, die sich besonders zum Ziel setzten, den praktischen Nutzen aktiv gesteuerter Lärmschutzwände nachzuweisen, wurden in einer ruhigen Umgebung im Außenbereich durchgeführt. Alle anderen Forschungen wurden unter Laborbedingungen, in reflexionsarmen Räumen, durchgeführt. Genaue Angaben über die Dimensionen und den Aufbau des Raumes sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Raumbedingungen der Forschungsarbeiten

Forschungsarbeit	Raumbedingung
<b>Omoto 93</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schallreflexionsarmer Raum mit Gitterboden</li> <li>• Boden in Nähe der Quelle mit Absorptionsmaterial ausgekleidet</li> </ul>
<b>Omoto 97</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außenbereich (Reisfeld)</li> </ul>
<b>Duhamel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außenbereich (zw. 2 Feldern)</li> </ul>
<b>Shao</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung mittels Simulation unter Bedingung eines absorbierenden Bodens</li> </ul>
<b>Guo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schallreflexionsarmer Raum mit Gitterboden 4,2x4,2x4,2 m<sup>3</sup></li> <li>• Experiment ohne/mit Bodenreflexionen → Bodenbedeckung mit Teppich/Metallplatten</li> </ul>
<b>Berkhoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Angaben (Simulation)</li> </ul>
<b>Niu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schallreflexionsarmer Raum mit Holzplatten abgedeckter Gitterboden</li> <li>• 11,2x7,8x5 m<sup>3</sup></li> </ul>
<b>Tarabini</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kleiner Raum ausgelegt mit absorbierendem Material (Simulation)</li> </ul>
<b>Liu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• semi-reflexionsarmer Raum</li> <li>• 11,2x7,8x5 m<sup>3</sup></li> </ul>
<b>Koh</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schallreflexionsarmer Raum</li> </ul>
<b>Schubert</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• semi-reflexionsarmer Raum</li> <li>• 6,7 x 4,3 x 2,8 m<sup>3</sup></li> </ul>

### 3.2.2 Aufbau der Lärmschutzwand

Mit Ausnahme des Versuchsobjektes (eine lange Steinwand) in Duhamels [DUHAMEL97] Forschungsarbeit wurden alle Lärmschutzwände mittels eines Modells nachgebildet. Wie aus Tabelle 3 zu entnehmen ist, wurden Holz und Platten aus Stahl am häufigsten verwendet.

Tabelle 3: Aufbau und Dimensionen der Modelllärmschutzwand/Lärmschutzwand

Forschungsarbeit	Aufbau der Lärmschutzwand
<b>Omoto 93</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 mm Stahlplatte zw. 2 Gipskartonplatten (12 mm, 1,1x4 m<sup>2</sup>)</li> </ul>
<b>Omoto 97</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2x0,8 mm Stahlplatten gefüllt mit Steinwolle</li> <li>• 0,2 m; 2x20 m<sup>2</sup></li> </ul>
<b>Duhamel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr lange Steinwand</li> <li>• 2,5 m hoch</li> </ul>
<b>Shao</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• biegesteife LSW als Bedingung in Simulation</li> </ul>
<b>Guo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Sperrholzplatten gefüllt mit Schaumstoff</li> <li>• 0,05 m; 1x4,2 m<sup>2</sup></li> </ul>
<b>Berkhoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Angaben (Simulation)</li> </ul>
<b>Niu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Holzplatten</li> <li>• 1,22 m hoch</li> </ul>
<b>Tarabini</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Angaben</li> </ul>
<b>Liu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Holzplatten</li> <li>• 1,22 m hoch</li> </ul>
<b>Koh</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressspanholzplatte (1,6 cm)</li> <li>• 2x1 m<sup>2</sup></li> <li>• quaderförmiger Schallschirmaufsatz (22x200x22 cm) Hohlraum ausgefüllt mit Polyesterflies</li> </ul>
<b>Schubert</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Holzplatte 2x1 m<sup>2</sup></li> <li>• quaderförmiger Schallschirmaufsatz ( 22x200x22 cm)</li> </ul>

### 3.2.3 Versuchsaufbau

Anhand der Untersuchungsgegenstände, die besonders in den Forschungsarbeiten der letzten Jahre genauer beleuchtet wurden (Abbildung 11), ist zu erkennen, dass der Anordnung von Sekundärschallquellen und Fehlersensoren eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Mittels der Optimierung der Position des ANC-Systems soll die Effektivität der aktiven Lärmschutzwand gesteigert werden. Alle Versuchsanordnungen sind grafisch im Anhang A-4 zu finden. In den folgenden Abschnitten werden die Besonderheiten der Versuchsaufbauten beziehungsweise die Anordnungsmerkmale, die sich von den Versuchen untereinander abgrenzen, beschrieben. Mit einer Ausnahme wurde bei allen Versuchen jeweils ein Lautsprecher als Primärschallquelle verwendet. Dieser wurde mittels eines Signalgenerators und eines Verstärkers betrieben.

In der ersten Forschungsarbeit Omotos [OMOTO93] wurden vier Sekundärschallquellen mit einem Abstand von  $d = 0.3 \text{ m}$  zwischen Primärschallquelle und Modelllärmschutzwand aufgebaut. Vier verschiedene Konfigurationen wurden getestet. Dabei wurde zum einen der Abstand der Sekundärschallquelle zur Lärmschutzwand zwischen  $0,2 \text{ m}$  und  $0,5 \text{ m}$  und zum anderen der Winkel der Sekundärschallquelle zur aktiv gesteuerten Lärmschutzwand zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  variiert. Der Boden des schalltoten Raumes in der Nähe der Primärschallquelle wurde mit Absorptionsmaterial bedeckt, um die Körperschallübertragung und die Reflexionen vom Boden zu reduzieren. Die Primärschallquelle emittierte reine Töne mit den Frequenzen  $250$ ,  $125$  und  $1000 \text{ Hz}$ . Auf Empfängerseite fand keine Bodenbedeckung mit Absorbern statt. Die Empfängerpunkte wurden in zwei Ebenen angeordnet und befanden sich in Nähe der aktiven Lärmschutzwand (Anhang A-4 1).

Die Versuchsanordnungen in Omoto's [OMOTO97] zweiter Forschungsarbeit weisen besonders hinsichtlich der Empfängerpunkte Unterschiede zu der ersten Arbeit auf. Es fand zwar in der Schattenzone der Lärmschutzwand ebenfalls eine Abtastung von Empfängern auf zwei Ebenen statt (Anhang A-4 2), jedoch wurden die Untersuchungen auf die Ferne ausgeweitet. Im ersten Experiment, in dem ein definiertes Signal als Primärschallquelle diente, befand sich der von der Lärmschutzwand entfernteste Empfänger auf der Koordinate  $x = 80 \text{ m}$ . In einem Abstand von  $50 \text{ m}$  wurde entlang der Barriere in einem Bereich  $-50 \text{ m} < y < 15 \text{ m}$  alle  $5 \text{ m}$  ein Empfängermesspunkt errichtet. (Anhang A-4 3). Zusätzlich zu den Untersuchungspunkten in der Ferne der Wand wurde ein Messpunktegitter hinter der Lärmschutzwand mit einer Reichweite von  $2 \text{ m} < x < 8 \text{ m}$  installiert (Anhang A-4 4). Zehn Sekundärschallquellen mit einem Abstand zur Beugungskante der Lärmschutzwand von  $0,5 \text{ m}$  und einem Winkel von  $60^\circ$  kamen zum Einsatz. Unter Verwendung des Gebläses als Primärschallquelle (zweites

Experiment) besaß das Messpunktegitter eine Reichweite von  $x = 20$  m. Das Gebläse mit acht Rotorblättern und einer Drehzahl von 15,6 Umdrehungen pro Sekunde wurde mit einem Abstand zur Beugungskante von 3,15 m aufgestellt und diente als reale Schallquelle (Anhang A-4 5). Es wurden sechs Sekundärschallquellen mit den gleichen Positionsmerkmalen wie im ersten Experiment, ebenfalls zwischen Primärschallquelle und Lärmschutzwand (Anhang A-4 6), angebracht.

Duhamel [DUHAMEL97] führte seine Experimente an einer realen, sehr langen Steinwand durch. Als Primärschallquelle wurden ein Rosa Rauschen und ein harmonisches Signal gewählt. Die Schallquelle stand in einem Abstand von 7,12 m zur Wand. Im Vergleich zu den Primärschallquellenpositionen aller Forschungsarbeiten ist diese Entfernung mit Abstand die Größte. Der Bereich, in dem die Primärschallquellen in der Regel aufgestellt wurden, lag zwischen  $-2 \text{ m} < x < -1 \text{ m}$ . In Duhamels Forschungsarbeit wurde unter anderem die Position der Sekundärschallquellen untersucht. Hierfür wurden drei unterschiedliche Positionen justiert und miteinander verglichen. Die Anbringung jeweils einer Sekundärschallquelle hinsichtlich der z-Koordinate erfolgte in Nähe der Schallschirmkrone, in Nähe des Bodens und in Höhe der Barrierenmitte (Anhang A-4 7). In einem Versuch wurden die Sekundärschallquellen in der Schattenzone der Lärmschutzwand angebracht. Da sich allerdings ein negatives Ergebnis nach den ersten Messungen abzeichnete, wurde dieser Fall nicht weiter untersucht. Es wurden in der Schattenzone 30 Messpunkte in einer Höhe von 1,65 m als Empfänger angebracht. Der zur Steinwand am nächst gelegenste Empfänger war 2 m hoch und der am entferntest gelegene 42 m hoch. Die Fehlermikrofone wurden ebenfalls in der Schattenzone angeordnet (Anhang A-4 8).

Shao [SHAO97] verwendete in seiner rein simulierten Forschungsarbeit entweder elf oder fünf Sekundärschallquellen, die in einer linien- oder bogenförmigen Anordnung zwischen der Primärschallquelle und der Lärmschutzwand angebracht wurden. Im Falle der bogenförmigen Anordnung wurde die Primärschallquelle im Mittelpunkt des Kreisbogens positioniert. Diese emittierte ein Signal mit einer Frequenz von 5000 Hz (Anhang A-4 9).

Unter Anwendung von drei Sekundärschallquellen und drei Fehlersensoren untersuchte Guo [GUO98] den Einfluss der Bodenreflexionen auf die Extra-Einfügungsdämpfung der aktiven Lärmschutzwand. Der Boden wurde hinsichtlich der unterschiedlichen Bodenbedingungen reflektierend/nicht reflektierend mit Metallplatten/Teppich ausgelegt. Während die Fehlersensoren über der Beugungskante der Lärmschutzwand aufgestellt wurden, wurden die Sekundärschallquellen zwischen Lärmschutzwand und Primärschallquelle positioniert. Die Empfängerpunkte wurden in einer Höhe von 0,5 m direkt hinter dem Schallschirm in der x-y-Ebene angebracht. Ein ramp-wave Signal mit Fre-



quenzkomponenten im Bereich  $f = 0 \dots 630$  Hz diente als Primärschall (Anhang A-4 10).

Das von Berkhoff [BERKHOF05] entwickelte Simulationsmodell grenzt sich deutlich von den anderen Versuchsaufbauten ab. Berkhoff verwendete eine Primärschallquelle, die sich parallel zur y-Achse bewegte. Des Weiteren wurden die Sekundärschallquellen und Fehlersensoren in der Schattenzone der Lärmschutzwand positioniert. Diese Forschungsarbeit war die einzige, die eine Positionierung der Sekundärschallquellen in der Schattenzone festlegte. Die Fehlersensoren wurden sowohl im Nahfeld als auch im Fernfeld aufgebaut. Neben den Mikrofonen, die als Fehlersensoren und Messmikrofone (Empfänger) dienten, wurden Referenzsensoren zwischen Lärmschutzwand und beweglicher Lärmquelle angebracht (Anhang A-4 11).

Hauptuntersuchungsgegenstand in Niu's [NIU06] Arbeit war die Positionsoptimierung der ANC-System-Bestandteile. Dabei wurden drei Konfigurationen und aufbauend hierauf drei Versuchsaufbauten analysiert. Entscheidendes Merkmal für diese Konfigurationen war die Positionierung der Fehlersensoren. Mit einem Abstand von 0,08 m zu den Sekundärschallquellen, welche sich auf der Schallschirmkrone befanden, wurden die Fehlersensoren in der zentralen Achse der entsprechenden Sekundärschallquellen zwischen:

- Primärschallquelle und Sekundärschallquelle,
- Empfänger und Sekundärschallquelle oder
- über den Sekundärschallquellen (Anhang A-4 12) angeordnet.

Zur Anwendung kamen jeweils 16 Sekundärschallquellen und Fehlersensoren. Des Weiteren wurden Fehlersensoren in der Schattenzone bei  $x = 6$  m und  $z = 0,2$  m angebracht. An sechs Beobachtungspunkten im Bereich  $4 \text{ m} < x < 6 \text{ m}$  in den Höhen  $z = 0,1$  m und  $z = 0,5$  m wurden Messungen durchgeführt. Die Primärschallquelle sendete ein Signal mit der Frequenz von 160 Hz aus und besaß einen 2 m Abstand zur Lärmschutzwand (Anhang A-4 13).

Im Gegenteil zu Niu's Untersuchung, in der das primäre Schallsignal durch einen Ton dargestellt wurde, untersuchte Tarabini [TARABINI07] die Extra-Einfügungsdämpfung an einer aktiven Barriere bei der die Primärschallquelle ein Breitbandgeräusch ( $f=50\dots300$  Hz) emittierte. Die Primärschallquelle befand sich 2 m vor der Lärmschutzwand. Die Schalldruckreduzierung wurde an acht Messpunkten aufgenommen.

Aufbauend auf Erkenntnissen der Versuchsanordnung aus Niu`s Arbeit entwickelte Liu [LIU08] ein Zwei-Reihen-System für die Anordnung der Sekundärschallquellen. Diese wurden in symmetrischer Anordnung auf eine dünne Platte mit einer Länge  $l = 6$  m angebracht. Diese Platte wurde an der Schallschirmkrone befestigt. Hinsichtlich des Abstandes zur Primärschallquelle wurden diese Reihen als Fern- oder Nahsystem definiert (Anhang A-4 14). Der Abstand der Mittellinien der Reihen betrug 55 cm. Es wurden 16 Sekundärschallquellen und 16 Fehlersensoren verwendet, die über der Mittelpunktachse des jeweils entsprechenden Lautsprechers angebracht wurden. Zwischen diesen beiden ANC-System-Bestandteilen war ein Abstand von 0,08 m. Als Primärschallquelle wählte Liu ebenfalls ein Geräusch mit einer Terzbandbreite, dessen Mittenfrequenz  $f_m = 160$  Hz war. Die Koordinaten der Primärschallquelle und der sechs Empfänger waren im Vergleich zu Niu`s Versuchsaufbau identisch (Anhang A4-15).

Der Versuchsaufbau aus [Schubert11] (Anhang A-4 16) ist dem Aufbau der experimentellen Untersuchungen aus [KOH04] (Anhang A-4 17) mit Ausnahme der Primärschallquellenposition identisch. Auf der Empfängerseite wurden zwei Messmikrofonreihen im Abstand von 1,6 m und 3,2 m mit jeweils fünf Empfängerpunkten installiert. Diese Empfängerreihen befanden sich auf einer Linie mit den sekundären Schallquellen und der Primärschallquelle. Insgesamt wurden drei sekundäre Schallquellen in den Schallschirmaufsatz eingebaut. Die Abbildung 13 stellt die Anordnung der sekundären Schallquellen dar. Schlussfolgernd ergaben sich drei verschiedene Messebenen. Je nach zu untersuchender Messebene wurde immer nur eine sekundäre Schallquelle aktiviert. Zudem wurde ein Fehlermikrofon verwendet, welches an den Messebenen eins bis drei variabel angebracht wurde. In der Forschungsarbeit [KOH04] wurden für die Untersuchungen zwei Primärschallquellenpositionen verwendet. Es wurden Messungen durchgeführt, bei denen die Quelle auf Höhe des Schallschirmaufsatzes und in Bodennähe platziert wurde. Die Entfernung zur Lärmschutzwand betrug 2,07 m.

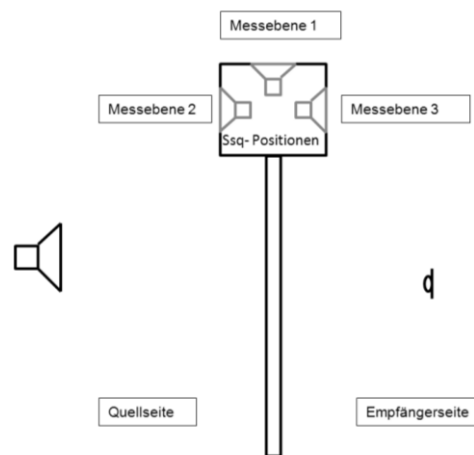


Abbildung 13 Position der sekundären Schallquellen und die sich daraus ergebenden Messebenen

### 3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Omoto's [OMOTO93] erstes Experiment unter Laborbedingungen in einem schallreflexionsarmen Raum erbrachte den Nachweis von einer Extra-Einfügungsdämpfung an einer aktiv gesteuerten Lärmschutzwand. Eine besondere Wirksamkeit des Effektes der Mehr-Dämpfung zeichnete sich bei den Untersuchungen mit den Primärschallsignalen  $f = 250$  Hz und  $f = 500$  Hz ab. Des Weiteren ließen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass die Effektivität einer aktiven Lärmschutzwand gesteigert werden kann, wenn die Sekundärschallquellen im gleichen Winkel wie die Primärschallquellen liegen und der Abstand zwischen den beiden Schallquellen geringer wird. Es konnte in den Untersuchungen mit den  $f = 250$  Hz und  $f = 500$  Hz Primärschallsignalen eine Extra-Einfügungsdämpfung von mindestens 12 dB an jedem Empfängerpunkt nachgewiesen werden. Allerdings konnte dieses positive Ergebnis nicht mit der 1 kHz-Untersuchung bekräftigt werden. Denn in allen Empfängerpunkten wurde nach der Aktivierung des ANC-Systems ein erhöhter Schalldruckpegel an der Lärmschutzwand gemessen. Die Einfügungsdämpfung  $D_{e,s}$  der Lärmschutzwand ist mit dem aktiven System gesunken. Es zeichnete sich deutlich ab, dass weitere Untersuchungen notwendig waren, um scheinbare Abhängigkeiten zu erforschen und zu formulieren. Mögliche Abhängigkeiten deuteten sich zwischen der Frequenz des Störgeräusches und der Anordnung der Sekundärschallquellen bezüglich Winkel und Abstand zur Primärschallquelle an. Die Ergebnisse des Experimentes bestätigten die ermittelten Ergebnisse aus der durchgeführten numerischen Simulation. Die Fortführung der Forschungsarbeit von Omoto erfolgte nur wenige Jahre nach dem Nachweis über den Effekt der Extra-Einfügungsdämpfung mittels ANC-Systemen an Lärmschutzwänden. Omoto [OMOTO97] erweiterte seine Untersuchung, indem eine Barriere im Freien genutzt wurde und unter anderem ein Gebläse als Primärschallquelle zum Einsatz kam.

Die Experimente erbrachten zusätzliche Rückschlüsse auf den praktischen Nutzen aktiv gesteuerter Hindernisse und bekräftigten die Funktion dieser Anwendungen. Unter Verwendung eines Tones mit der Frequenz  $f = 125$  Hz als Störgeräusch (Primärschall) konnte in fast allen Empfängerpunkten, auch in einer Entfernung von über 50 m zur Wand, eine Mehrdämpfung von mindestens 6 dB nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde deutlich, dass eine Erhöhung der Anzahl an Sekundärschallquellen die Extra-Dämpfung steigern kann. Laut Omoto deuteten die Ergebnisse, die in dem Experiment, welches unter Nutzung eines Gebläses durchgeführt wurde an, dass die Methode der Erhöhung der Einfügungsdämpfung von Lärmschutzwänden mittels ANC-Systemen auch für Alltagsgeräusche anwendbar ist. Konkrete Werte wurden jedoch nicht genannt. Allerdings wurde darauf hingewiesen, dass die Messungen unter nicht idealen Außenbedingungen durchgeführt wurden. Die Durchführung der Messungen erfolgte bei Windgeschwindigkeiten zwischen 6-7 m/s. Das Auftreten von Messfehlern infolge des Windes, der zu verstärkten Nebengeräuschen führte, beeinflusste das Ergebnis in einem nicht einschätzbaren Bereich. Es wurde deutlich, dass weitere Untersuchungen notwendig waren, um die Wirkung von aktiven Lärmschutzwänden im Außenbereich und bei breitbandigen Geräuschen zu bestätigen.

Diese Bestätigung erbrachte unter anderem Duhamel [DUHAMEL97]. In der Außenbereichsuntersuchung wurden als Primärschallquellen sowohl harmonische Signale mit den Frequenzen 125 und 500 Hz als auch Rosa Rauschen verwendet. Der Versuch betrachtet unterschiedliche Untersuchungsgegenstände. Im ersten Untersuchungsgegenstand, der Position der Sekundärschallquelle und deren Einfluss auf die Effizienz des ANC-Systems, wurde herausgefunden, dass eine Mehr-Dämpfung nicht von der Positionierung der Sekundärschallquelle abhängig ist, solange sich die Sekundärschallquelle auf der Seite der Primärschallquelle befindet und dabei nicht zu nah am Boden ist. Im Fall der harmonischen Geräuschquelle mit  $f = 125$  Hz konnte die Einfügungsdämpfung um 9 dB verbessert werden. Des Weiteren wurde der Einfluss des Fehlermikrofons in Bezug auf seine Position untersucht. Das Fehlermikrofon wurde auf unterschiedlichen Positionen in der Schattenzone der Lärmschutzwand aufgestellt. Aus der Messung resultierte, dass eine erhöhte Lage des Fehlermikrofons (in Schallschirmkronenhöhe) zu einer sinkenden Effizienz der aktiven Lärmschutzwand führt. Duhamel führte zudem Untersuchungen mit einem Rosa Rauschen als Primärschallquelle durch. Es wurde ersichtlich, dass das ANC-System besonders bei tiefen Frequenzen signifikante Dämpfungen hervorruft. In Nähe der Primärquellen-Sekundärquellen-Achse konnte in den Empfängerpunkten, die von der Wand weit entfernt lagen, eine Mehrdämpfung von 4-6 dB gemessen werden. Für alle Messpunkte, die von dieser Achse seitlich lagen, konnten keine Extra-Einfügungsdämpfungen nachgewiesen werden. Diese Beobachtung wurde ebenfalls in den Versuchen, in denen ein harmonisches Signal als Primärschall verwendet wurde, festgestellt. Zusammenfassend

bestätigt die Forschungsarbeit die Wirksamkeit aktiver Systeme an Lärmschutzwänden im Außenbereich.

In Shaos [SHAO97] numerischer Simulation wurde nachgewiesen, dass eine bogenförmige Anordnung der Sekundärschallquellen gegenüber der linienförmigen Anordnung die Effektivität des Aktiv-Systems verbessert. Diese Anordnung erfordert allerdings einen weitläufigen Platzbedarf, sodass die Umsetzung der Bogenform in der Praxis zu Problemen führen kann. Zusätzlich erfordert die Strategie der Sekundärschallquellenanordnung experimentelle Untersuchungen, die für den tieffrequenten Bereich ausgelegt sind. Denn Shao verwendete in der Simulation als Primärschall ein Signal mit einer hohen Frequenz ( $f = 5000 \text{ Hz}$ ).

Bisher wurde der Einfluss von Bodenreflexionen in den Forschungsarbeiten außer Acht gelassen. Dabei erbrachte Guo [GUO98] mittels Simulationen und Experimenten den Nachweis, dass Bodenreflexionen den Effekt der Mehrdämpfung beachtlich reduzieren. Verminderungen der Mehrdämpfung um 5 dB konnten in fast allen Empfängerpunkten auf der Messebene ermittelt werden. Durch eine systematische Untersuchung (Messungen mit vier unterschiedlichen Bodenbedingungen) konnte festgestellt werden, dass quellseitige Bodenreflexionen den größten Beitrag zur Reduzierung der Extra-Einfügungsdämpfung leisten. Demnach ist es angebracht spezielle Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Verminderung von Bodenreflexionen zu ergreifen. Dies ist insbesondere auf der Quellseite erforderlich.

Die Simulation von Berkhoff [BERKHOF05], in der eine bewegliche Primärschallquelle und zusätzliche Referenzsensoren benutzt wurden, erbrachte folgendes Ergebnis: Unter Nutzung der Referenzsensoren können große Schallpegelminderungen für breitbandige Geräusche erzielt werden. Dies trifft auch auf Empfänger zu, die weit entfernt von der Barriere ihren Standort haben. Auf Grund der Positionierung der Sensoren in Nähe der Lärmschutzwand konnte die Windanfälligkeit reduziert werden. Eine höhere Robustheit der Lärmschutzwand war die Folge.

Der Schwerpunkt in Niu's [NIU06] Forschungsarbeit wurde auf die Positionsoptimierung der Fehlersensoren gelegt. Bei der Untersuchung der drei Konfigurationen:

- Fehlersensoren zwischen Primärschallquelle und Sekundärschallquelle,
- Fehlermikrofon zwischen Empfänger und Sekundärschallquelle und
- Fehlermikrofon über Sekundärschallquelle

erwies sich letztere als effektivste Variante, um eine zusätzliche Erhöhung des Einfügungsdämpfungsmaßes zu erhalten. Die Konfiguration, in der sich die Fehlersensoren zwischen Empfänger und Sekundärschallquelle befanden, erzielte fast die gleichen Ergebnisse. Das experimentelle Ergebnis konnte mit Hilfe der durchgeführten Simulation bestätigt werden. In dieser Simulation wurden an den Empfängerpunkten Extra-Einfügungsdämpfungen von über 6 dB erreicht. Mittels Simulationen wurde darüber hinaus herausgefunden, dass es für eine größtmögliche Extra-Einfügungsdämpfung einen optimalen Abstand zwischen Fehlersensoren und Sekundärschallquelle gibt. Dieser optimale Abstand ist abhängig von der Frequenz des Geräusches, der Positionierung der Fehlersensoren und der Lage der Empfängerpunkte. Diese Beobachtungen wurden allerdings innerhalb der Forschungsarbeit nicht genauer formuliert.

In der Forschungsarbeit von Tarabini [TARABINI07], die größtenteils aus Simulationen bestand, wurden durchschnittliche Schalldruckpegelminderungen in der Schattenzone einer Einfriedung mit Hilfe eines dezentralen ANC-Systems erreicht. Die durchschnittliche Extra-Einfügungsdämpfung wurde hauptsächlich von der Lautsprecherrichtwirkung und dem Abstand zwischen Sekundärschallquellen und Fehlermikrofonen bestimmt. Während die Wandreflexionen und der Abstand zwischen Einfriedungswand und Fehlersensoren keinen Einfluss auf die Wirksamkeit der aktiven Einfriedungswand hatten, konnte man in Bezug auf die Raumdimension und Quellposition einen geringfügigen Einfluss feststellen. Durchgeführte experimentelle Tests zeigten für einige Frequenzen eine Erhöhung der Einfügungsdämpfung um 10 dB auf.

Liu's [LIU08] Forschungsarbeit, welche den Einfluss von doppelreihigen und einreihigen Anordnung von Sekundärschallquellen auf den Effekt der Extra-Einfügungsdämpfung untersuchte, wies eine maximale Minderung derselben um 6 dB nach. Diese wurden mit der doppelreihigen Sekundärschallquellenanordnung, dem sogenannten Fern-Nah-System, erreicht. Die Benutzung des Fern-Nah-Systems hatte zur Folge, dass die Anzahl der Sekundärschallquellen gegenüber dem Nah- oder Fern-System höher war. Demnach wurden Messungen mit einer wechselnden Anzahl von aktivierten Sekundärschallquellen durchgeführt. Des Weiteren wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen eine einreihige und eine doppelreihige Anordnung mit gleicher Sekundärschallquellenanzahl aktiviert wurde. Resultate dieser Untersuchungen waren:

- Bei Aktivierungen einer Sekundärschallquellenreihe, erzielte das Nah-System einen besseren Mehr-Effekt als das Fern-System.
- Je höher die Dichte von Sekundärschallquellen war, desto größer war der Effekt der Mehrdämpfung.

- Bei gleicher Anzahl von Sekundärschallquellen besitzt das ANC-System bei einreihiger Anordnung einen besseren Mehr-Einfügungsdämpfungseffekt, als bei doppelreihiger Anordnung.

Die experimentellen Untersuchungen aus [KOH04] konzentrierten sich auf die Positionierung der Sekundärschallquelle und des Fehlermikrofons an dem Schallschirmkronenaufsatz. Koh variierte die Position der Sekundärschallquelle mit der Position des Fehlermikrofons auf den drei Messebenen des Schallschirmaufsatzes (Abbildung 10). Dabei wurde herausgefunden, dass bei Anbringung der sekundären Schallquelle auf der Messebene 1 (Sekundärschallfeldabstrahlung nach oben) und der Schalldruckminimierung auf der Schattenseite (Fehlersensor auf Ebene 3) die besten Extra-Einfügungsdämpfungen erzielt werden konnten. Für diese Anordnung konnte ein maximales Verbesserungsmaß von 12,8 dB verzeichnet werden. Die Messanordnungen in denen das Fehlermikrofon näher zu den Empfängern positioniert war als die Sekundärschallquelle, besaßen mit Ausnahme einiger Frequenzen eine positive Wirkung. Die Anbringung der Sekundärschallquelle in Richtung der Empfänger (Messebene 3) erbrachte ein negatives Verbesserungsmaß. Das bedeutet, dass sich der Schalldruckpegel an den Empfängerpunkten mit ANC-Regelung gegenüber ohne ANC-Regelung erhöhte. Des Weiteren erwies sich, dass mittels unterschiedlicher Positionierung von Sekundärschallquelle und Fehlersensor eine günstigere Schallfeldbeeinflussung erreicht werden kann. Mit diesen experimentell ermittelten Ergebnissen konnten die numerischen Untersuchungen bestätigt werden.

Innerhalb der Untersuchung [SCHUBERT11] wurden wie in der Studie [KOH04] die Positionen des Fehlermikrofons und der Sekundärschallquelle verändert. Auf diese Weise sollte die bestmögliche Variante der Anordnung von Sekundärschallquelle und Fehlermikrofon herausgefunden werden. Die Untersuchung [SCHUBERT11] wies hinsichtlich der optimalen Position des Fehlermikrofons am Aufsatz ein anderes Ergebnis auf als in der Arbeit [KOH04]. In der Untersuchung erzielte eine Positionierung des Fehlermikrofons auf der Krone des Aufsatzes (Messebene 1) oder auf der Aufsatzebene, die zur primären Schallquelle gerichtet ist (Messebene 2), die effektivste Wirkung. Hinsichtlich der Sekundärschallquellenposition konnte eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus [KOH04] verzeichnet werden. Eine Abstrahlung des sekundären Schallfeldes aus der Messebene 1 erreichte die besten Verbesserungsmaße.

Die vorgestellten Forschungsarbeiten konnten den Beweis erbringen, dass das Einfügungsdämpfungsmaß einer Lärmschutzwand unter Nutzung von Active Noise Control Systemen erhöht werden konnte. Besonders die Ergebnisse aus den Untersuchungen [KOH04] und [SCHUBERT11] zeigten, dass eine lokale Beeinflussung des Schallfeldes an der Lärmschutzwand zu einer Minderung des Schallfeldes in der Schattenzone füh-

ren kann. Die Untersuchungen von [KOH04] und [SCHUBERT11] erzielten hinsichtlich der optimalen Position des Fehlermikrofons unterschiedliche Ergebnisse. Deswegen wird im folgenden Kapitel eine Untersuchung vorgestellt, die zur Verifizierung der optimalen Fehlermikrofonposition dienen soll.



## **4 Verbesserung der Einfügungsdämpfung einer Lärmschutzwand durch ein integriertes Active Noise Control System**

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen an einer Modelllärmschutzwand, die mittels eines Active Noise Control Systems betrieben wurden, vorgestellt. Dabei wird auf die Modelllärmschutzwand von [SCHUBERT11] zurückgegriffen. Die Untersuchung soll die Wirkung einer Extra-Einfügungsdämpfung, unter Einsatz von ANC-Systemen, reproduzieren und Aufschluss geben, ob es eine optimale Fehlersensorposition gibt, die eine globale Erhöhung der Abschirmwirkung hervorrufen kann. Da die Ergebnisse der optimalen Fehlersensorposition in [KOH04] und [SCHUBERT11] Differenzen aufweisen, wird in der Untersuchung einer Verifizierung dieser nachgegangen.

Doch bevor der Versuch beschrieben wird und die Ergebnisse dargestellt werden, wird zunächst eine wellentheoretische Beschreibung der Schallbeugung an der Schirmkronen vorgestellt. Bezug wird dabei einerseits auf die Untersuchung der Wirkung an zylindrischen Schallschirmaufsätzen aus [MOESER95] und andererseits auf das von Koh [KOH04] entwickelte Modell zur Darstellung des Schallfeldes hinter einer schallweichen Schallschirmkronen auf der Basis der Einführung eines sekundären Schallfeldes genommen.

### **4.1 Physikalische Beschreibung der Beugung von Schall an einer schallweichen Schallschirmkronen**

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf [KOH04] und [MOESER95]. In [KOH04] wird die Beschreibung des Schallfeldes hinter einer schallharten, halbunendlich ausgedehnten Schneide, die von einer schräg einlaufenden Welle getroffen wird, aus [MOESER95] aufgenommen und um die Integration einer sekundären Schallquelle in die Schallschirmkronen erweitert.

#### **4.1.1 Wellentheoretische Beschreibung des Schallfeldes hinter einem zylindrischen Schallschirmaufsatz**

Die vorwiegend theoretische Arbeit von Möser [MOESER95] untersucht die Verringerung des Schattenfeldes hinter Schallschirmen durch einen an der Schallschirmkronen angebrachten zylindrischen Körper (Abbildung 14).

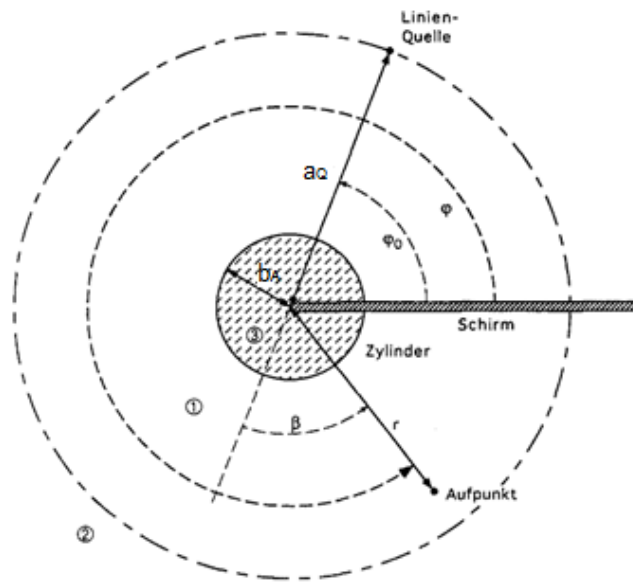


Abbildung 14 Geometrische Größen am halbumendlichen Schirm mit der Oberflächenimpedanz  $Z$ .  $a_Q, \varphi_0$ : Koordinaten der Quelle,  $r, \varphi$ : Koordinaten des Aufpunktes,  $b_A$ : Zylinderradius und dem Beugungswinkel  $\beta = \varphi - \pi - \varphi_0$  [Quelle: MOESER95, S. 569]

Die reflektierenden Eigenschaften des auf der halbumendlichen, schallharten Schneide aufgesetzten zylindrischen Schallschirmaufsatzes werden dabei durch eine lokal wirk-same Oberflächenimpedanz beschrieben. Es werden die Beugungserscheinungen an ideal schallweichen  $Z = 0$  und schallharten  $Z = \infty$  Zylindern untersucht. Das Schallfeld wird von einer ungerichteten Linienquelle erzeugt. Es wird eine große Entfernung zwi-schen der Schallquelle und dem Schallschirm vorausgesetzt, sodass der Schalleinfall als eine ebene Welle angenommen werden kann. Für eine unter dem Winkel  $\varphi_0$  einfal-lende Welle setzt sich der Druck  $p(r, \varphi)$  wie folgt zusammen:

$$p(r, \varphi) = p_{\text{Schirm}}(r, \varphi) + p_{\text{zyl}}(r, \varphi) \quad (4.1)$$

Der erste Summand beschreibt das Schallfeld am Schirm ohne den Aufsatz während der zweite Summand die Veränderung des Schallfeldes am Schirm durch den zylindri-schen Aufsatz wiedergibt. Auf die mathematische Beschreibung der zwei Schalldruck-anteile wird im Rahmen der Arbeit verzichtet, da dies aus [MOESER95] zu entnehmen ist.

Es stellt sich anhand der theoretischen Untersuchung heraus, dass eine betragsmäßig kleine Impedanz ( $Z \rightarrow 0$ ) im Vergleich zu einer betragsmäßig großen Impedanz ( $Z \rightarrow \infty$ ) eine bessere Abschirmwirkung des Schallschirmes hervorruft.

Bei einer Quellposition in Höhe der Schirmoberkante beträgt die Verbesserung für einen Zylinderdurchmesser bei einer Wellenlänge und einem Beugungswinkel von  $20^\circ$  um die 20 dB. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis ist das Prinzip der tangentialen Leistungsführung parallel zur Aufsatzoberfläche: Für eine gute Schattenwirkung muss die Impedanz so gewählt werden, dass sich entlang der Fläche möglichst kleine Intensitäten einstellen und der Leistungsfluss, um die mit dem Zylinder ausgestatteten Schirmkante, verhindert wird. Somit wird die Beugung des Schalls in die Schattenzone durch eine Ablenkung in vertikaler Richtung verhindert.

Dieses Ergebnis kann physikalisch mit Hilfe der Betrachtung von Teilchenbewegung in Aufsatznähe wie folgt erklärt werden: An einer ideal nachgiebigen Wandung (schallweich) wirkt die kontaktierte Luft als massenbehaftete Schicht, die auf ihrer „Außenseite“ dem anregenden Schallfeld ausgesetzt ist. Diese Schicht erfährt trotz der Schallfeldeinwirkung keine Kompression, da die widerstandsfreie Wandung eine Hemmung der Auslenkung ausschließt. Die Luft in dieser Grenzschicht ist somit druckfrei und wird als eine unverdichtete, frei bewegliche Masse angesehen. Die Auslenkungen der Grenzschichtmasse werden lokal von den Kräften der vorbeilaufenden Welle bestimmt. Die Grenzschicht wird nach außen gehoben, während auf ihrer „Außenseite“ ein Überdruck vorherrscht. Deswegen ist ein Anschmiegen des äußeren Druckfeldes an die Fläche des Zylinders nicht möglich und die Leistungsführung der Grenzschicht unterbunden. Das am Zylinder vorbeilaufende Schallfeld gelangt erst in größeren Abständen vom Zylinder in die Schattenzone. Das Schallfeld an einer schallharten Wandung verhält sich entgegengesetzt. Die Luft-Grenzschicht kann beim einfallenden Druckfeld nicht wie im Fall einer schallweichen Wandung, nach innen weichen. Folgend entstehen Verdichtungen und die Wellenfronten legen sich beim Vorbeilaufen der eintreffenden Wellen auch an die Schattenseite des Zylinders an. Das Schallfeld dringt in die Schattenzone ein.

Eine Auslegung des Aufsatzes auf Absorption führt nur bedingt zur Verbesserung der Wirkung von Schallschirmen. Denn für die Bildung des akustischen Schattens ist der tangentialer Leistungsfluss im Kantenbereich von großer Bedeutung. Absorbierende Schallschirmaufsätze nehmen die Schallenergie partiell durch Wärmeumwandlung aus dem Feld auf. Diese senkrechte „Schluckung“ minimiert aber nicht den tangentialen Leistungsfluss. Zudem sind Absorber in gewissen Frequenzbändern durch Steifeimpedanzen charakterisiert. Folglich stellt sich ein Leistungsfluss um den mit Absorption

ausgelegten Schallschirmaufsatz ein. Die Intensität schmiegt sich im Vergleich zu dem Fall  $Z \rightarrow \infty$  noch mehr an und es tritt eine verschlechterte Wirkung der Schallschutzwand auf.

Eine schallweiche Schallschirmoberkante kann durch einen Resonator in der Resonanzfrequenz realisiert werden. In [KOH04] werden die verschiedenen theoretischen und praktischen Untersuchungen über den Einfluss von Resonatoren auf die Schallbeugung an der Schallschirmkante vorgestellt. Grundsätzlich weist der Einsatz eines Resonators in der Schallschirmkrone einige Beschränkungen auf. Durch die geometrischen Abmessungen kann der Resonator für eine Zielfrequenz konstruiert werden. Unterhalb der Resonanzfrequenz sind jedoch Verschlechterungen der Abschirmwirkung zu verzeichnen. Des Weiteren können starke systembedingte Schwankungen des Frequenzganges auftreten. Zusätzliche Änderungen der Geometrie können diesen Schwankungen entgegenwirken. Zudem erfordert eine Auslegung der Resonatoren für tiefe Frequenzen große Dimensionen, sodass in diesem Fall auch eine Erhöhung der Lärmschutzwand für die Pegelsenkung in der Schattenzone in Betracht gezogen werden kann.

Im nächsten Abschnitt wird die im Kapitel 3 vorgestellte Forschungsarbeit [KOH04] nochmals aufgegriffen. Es wird ein Einblick in das theoretische Modell gegeben, welches eine aktive Regelung der Oberflächenimpedanz der Schallschirmkrone vorsieht. Die aktive Regelung erfolgt unter Einsatz einer sekundären Schallquelle in der Schallschirmkrone. Auf die Ergebnisse aus der numerischen und experimentellen Untersuchung wird in diesem Kapitel nicht eingegangen. Diese sind aus dem dritten Kapitel zu entnehmen.

#### **4.1.2 Wellentheoretische Beschreibung des Schallfeldes an einem aktiv zylindrischen Schallschirmaufsatz**

Die analytische Beschreibung des Schallfeldes an einem zylindrischen Schallschirmaufsatz aus [MOESER95] liefert den Ansatz für die Schallfeldbeschreibung im Bereich eines aktiv zylindrischen Schallschirmaufsatzes. In Abbildung 15 ist das vereinfachte Modell des halbunendlichen Schirmes mit einem aufgesetzten Zylinder und der integrierten sekundären Quelle dargestellt.

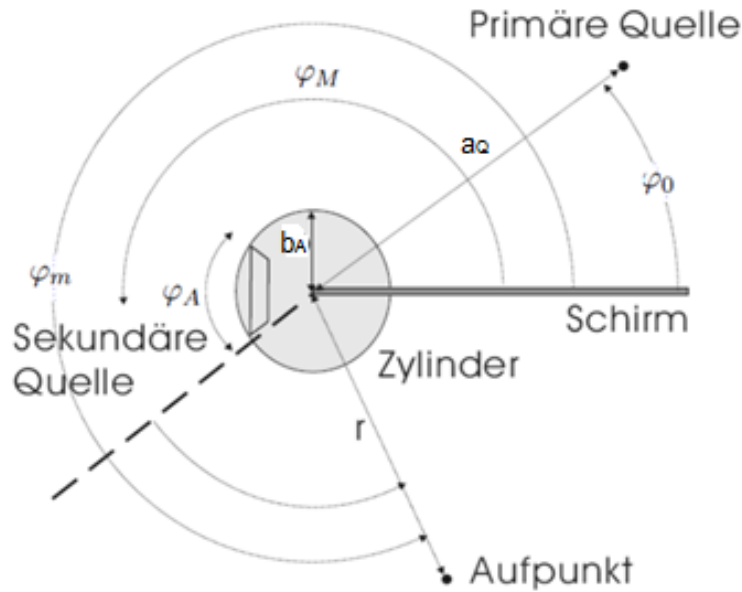


Abbildung 15 Modellordnung eines Schallschirmes mit aktiv zylindrischem Aufsatz zur Berechnung des Schallfeldes.  $a_Q$ : Entfernung zur Quelle,  $b_A$ : Radius des Aufsatzes,  $r$ : Radius zum Aufpunkt,  $\beta$ : Beugungswinkel,  $\varphi_0$ : Schalleinfallswinkel,  $\varphi$ : Winkel des Aufpunktes zum Schirm,  $\varphi_A$ : Öffnungswinkel zur sekundären Quelle,  $\varphi_M$ : Winkel von der Mitte der sekundären Quelle zum Schirm [Quelle: KOH04 S.23]

Das gesamte Schallfeld an einem beliebigen Aufpunkt  $(r, \varphi)$  lässt sich durch Addition der Schallschirmwirkung  $p_{Schirm}$ , Zylinderwirkung  $p_{Zyl}$ , und Wirkung der Sekundärquelle  $p_{akt}$ , beschreiben:

$$p_{ges}(r, \varphi) = p_{Schirm}(r, \varphi) + p_{Zyl}(r, \varphi) + \sum_{j=1}^J p_{akt_j}(r, \varphi) \alpha_j \quad (4.2)$$

mit  $\alpha_j$  ..... komplexer Steuerfaktor der sekundären Schallquelle

Der Steuerfaktor der Sekundärschallquelle wird so bestimmt, dass in dem betrachteten Bereich der Zylinderoberfläche die Summe der Schalldruckquadrate minimal wird.

$$\sum_{m=1}^M |p_{ges}(b, \varphi_m)|^2 = Min. \quad (4.3)$$

Mit dieser Einstellung der sekundären Schallquelle wird eine schallweiche Belegung der Zylinderoberfläche bewirkt (Active Soft Edge).

## 4.2 Verifizierung der Position des Fehlermikrofons am Aufsatz einer Modelllärmschutzwand

Die Untersuchung wurde an der aktiven Modelllärmschutzwand aus der Forschungsarbeit [SCHUBERT11] durchgeführt. Der Mess- und Versuchsaufbau wurde für diese Untersuchung ebenfalls aus [SCHUBERT11] übernommen, um den Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen aus [SCHUBERT11] und [KOH04] einfacher zu gestalten. Der Aufbau der Modelllärmschutzwand ist aus der Tabelle 3 zu entnehmen. In den Abbildungen 16 und 17 sind der Versuchsaufbau beziehungsweise der Messaufbau der aktiven Modelllärmschutzwand dargestellt. Die Messungen wurden in einem semi-reflexionsarmen Raum ( $6,7 \times 4,3 \times 2,8 \text{ m}^3$ ) durchgeführt.

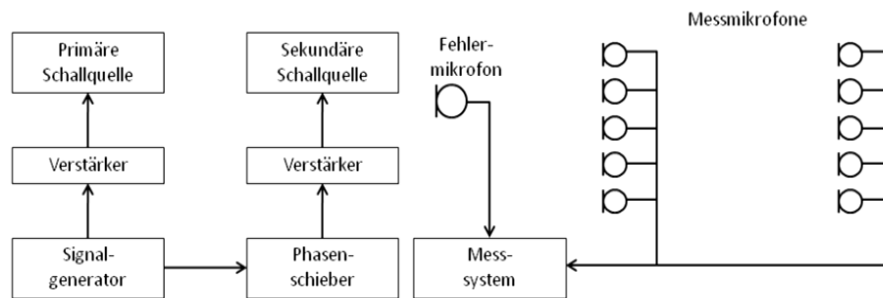


Abbildung 16 Versuchsaufbau der Modelllärmschutzwand [Quelle: SCHUBERT11 S.62]

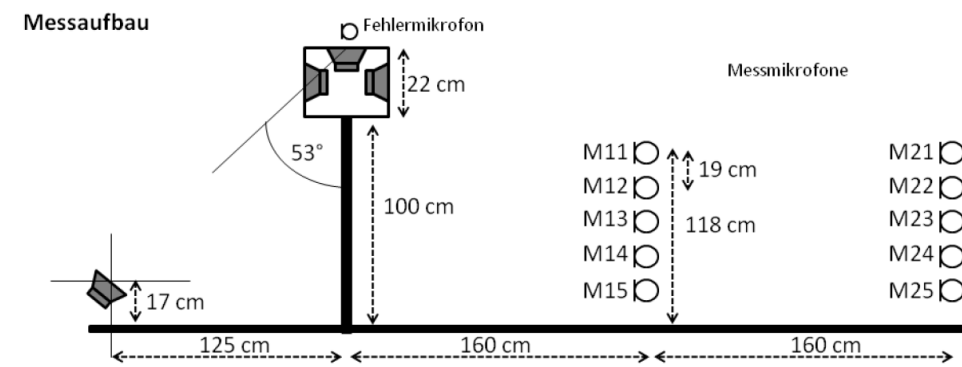


Abbildung 17: Messaufbau der Modelllärmschutzwand [Quelle: SCHUBERT11 S.62]

Die Messungen fanden unter der Betrachtung von drei Fehlermikrofonpositionen statt. Eine Anbringung erfolgte nach Abbildung 13 auf den Messebenen 1-3. Auf Grund der Übereinstimmung der optimalen Sekundärschallquellenposition in den Studien [SCHUBERT11] und [KOH04] wurde die Messebene 1 als Position der sekundären Schallquelle ausgewählt, um die Verifizierung der Fehlersensorposition durchzuführen. Es wurde bei den Frequenzen  $f = (125; 250; 500)$  Hz gemessen. Bevor eine Messung durchgeführt wurde, bestand zunächst erst einmal die Notwendigkeit eines Leistungsabgleiches der primären und sekundären Schallquelle. Als Referenzwert diente der Schalldruckpegel am Fehlermikrofon. Die Schallquellen wurden aufeinander abgestimmt, bis am Fehlermikrofon gleiche Schalldruckpegel vorherrschten. Nach dem Leistungsabgleich konnte die Messung gestartet werden. Mittels eines LabView Programmes wurde automatisch die Phase des sekundären Schalls schrittweise um  $\Delta\varphi = 5^\circ$  in dem Intervall von  $\varphi = 0^\circ$  bis  $\varphi = 355^\circ$  erhöht. Zu jeder Phasenänderung wurden die Schalldruckpegel am Fehlermikrofon und an den zehn Messmikrofonen in der Schattenzone der Modellärmschutzwand aufgezeichnet.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Messung mit dem Sinussignal  $f = 500$  Hz dargestellt. Die Messergebnisse aus den Untersuchungen zu den  $f = 125$  Hz und  $f = 250$  Hz befinden sich im Anhang A-5.

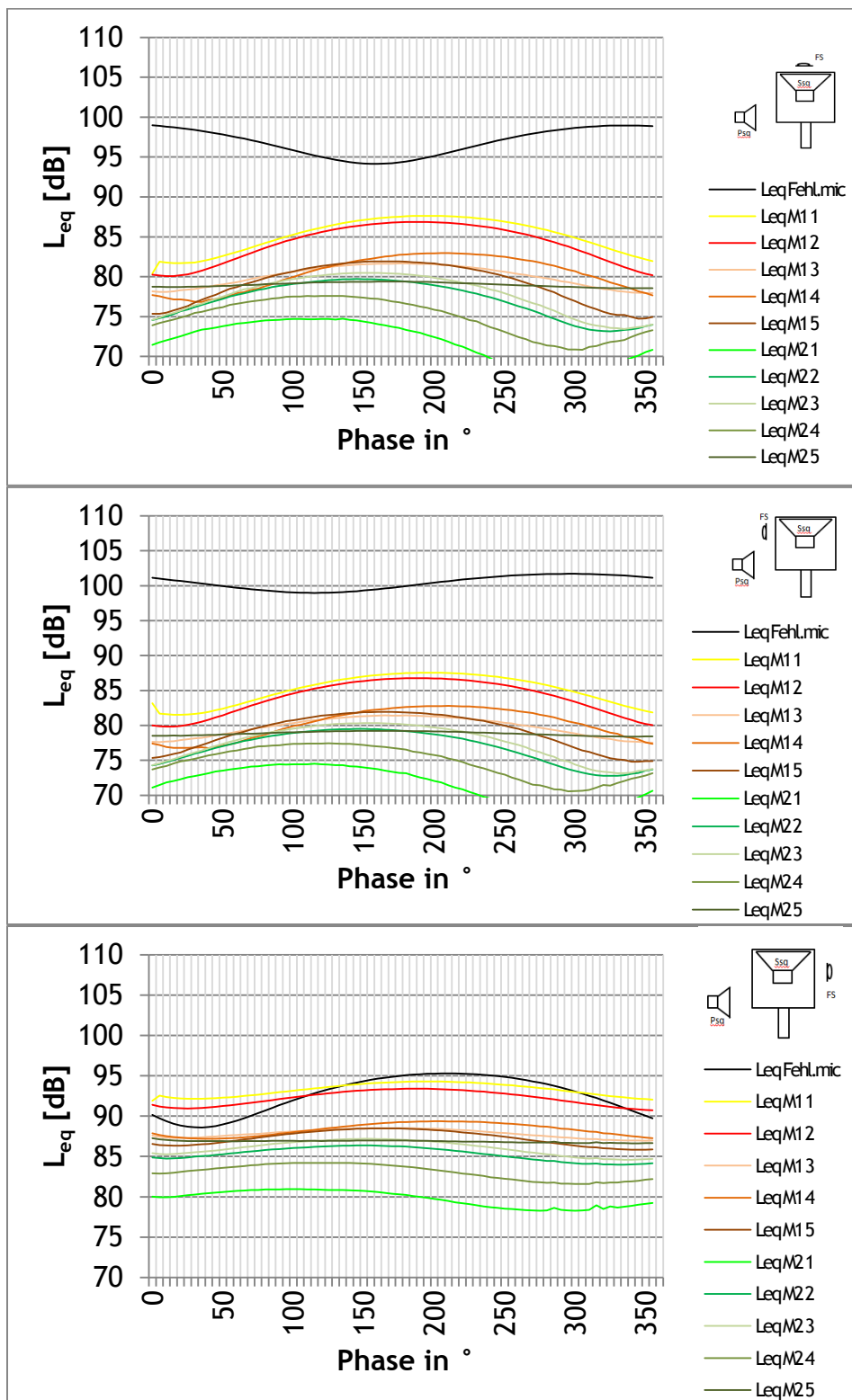


Abbildung 18: Verlauf des Schalldruckpegels an den Messmikrofonen und am Fehlermikrofon während der Phasenänderung des sekundären Schallsignals;  $f = 500$  Hz



Um die globale Wirkung in der Schattenzone zum Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon während der Phasenänderung deutlicher darzustellen, wurde eine energetische Mittelung der Schalldruckpegel aller Immissionspunkte durchgeführt (Abbildung 19-21).

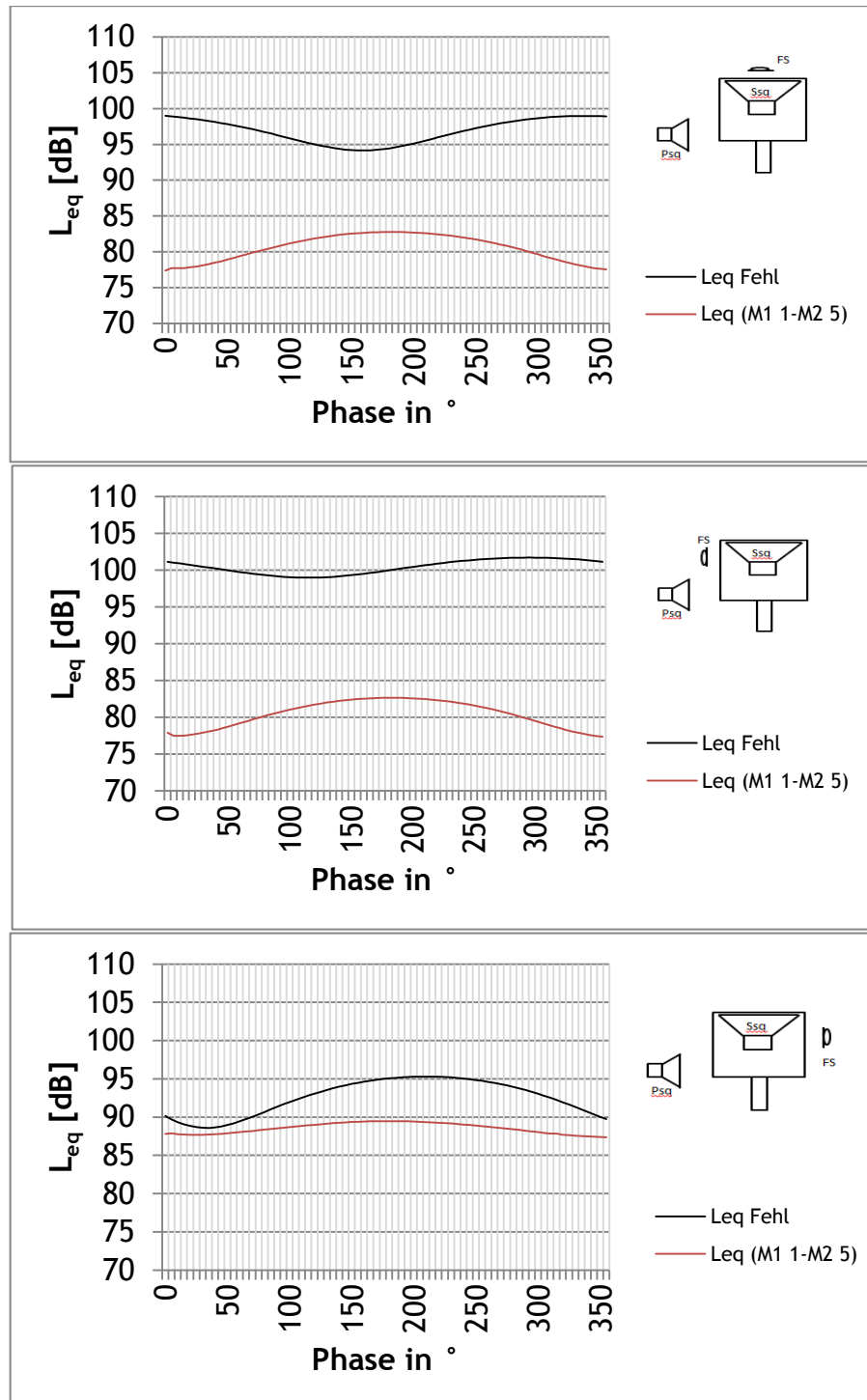


Abbildung 19: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals;  $f = 500$  Hz

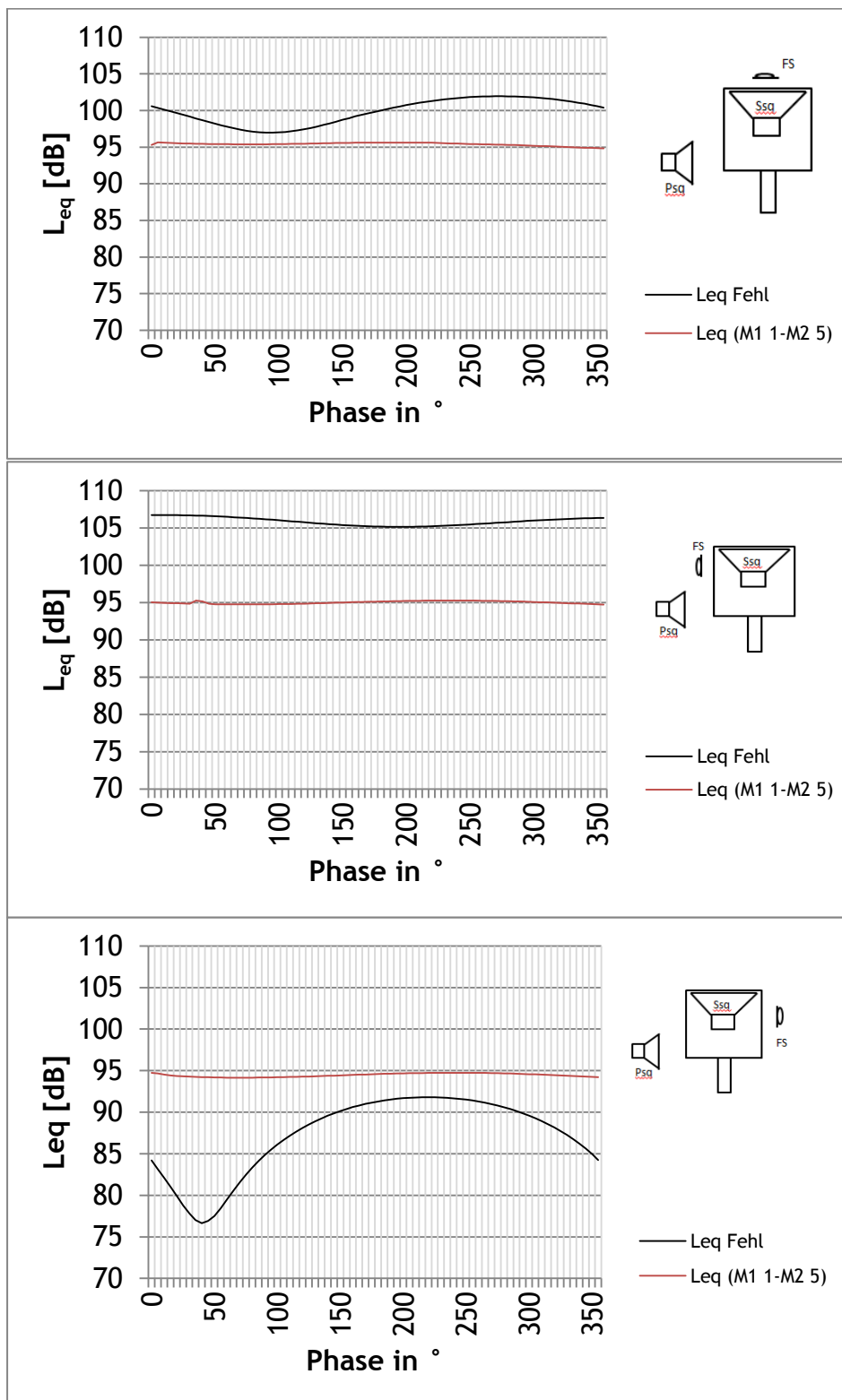


Abbildung 20: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals;  
 $f = 250$  Hz

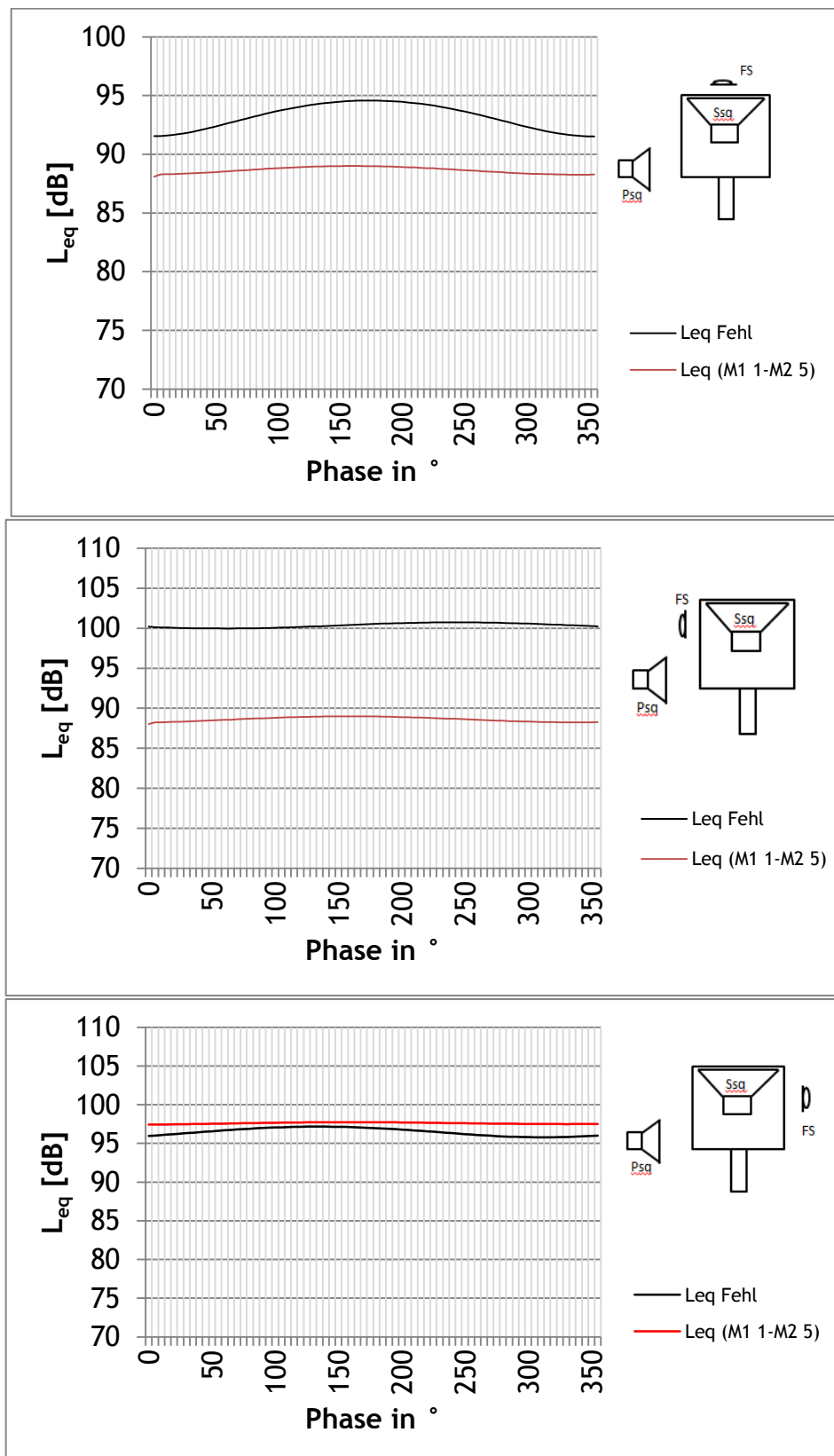


Abbildung 21: Schalldruckpegelverlauf am Fehlermikrofon und Verlauf des energetisch gemittelten Schalldruckpegels der Immissionspunkte während der Änderung der Phase des sekundären Signals;  $f = 125$  Hz

Besonders in der Abbildung 18 ist deutlich erkennbar, dass die aktive Beeinflussung Auswirkungen auf den energetisch gemittelten Schalldruckpegel aller Immissionspunkte ( $L_{eq}$  (M1 1- M2 5)) hat. Im Laufe der Phasenänderung des sekundären Schallsignals, verändert sich der gemittelte Immissionsschalldruckpegel ( $L_{eq}$  (M1 1- M2 5)) um 5 dB. Der Vergleich des Schalldruckpegelminimums am Fehlersensor und an den Immissionspunkten in Abhängigkeit von der Position des Fehlersensors ergibt, dass bei Anbringung des Fehlersensors auf der Messebene 3 (Aufsatzebene auf der Schallschirmschattenseite) die Minima der beiden Schalldruckpegelkurven in der gleichen Phase liegen. Deutlich erkennbar ist dies an der Abbildung 19. In den Abbildungen 20 und 21 ist diese Erscheinung tendenziell ablesbar. Die Anbringung des Fehlermikrofons an der Messebene 1 (auf dem Schallschirmaufsatz) und an der Messebene 2 (Aufsatzebene in Richtung Primärschallquelle) ruft eine Phasenverschiebung der Minima zwischen dem Schalldruckpegel am Fehlermikrofon und dem gemittelten Immissionsschalldruckpegel hervor.

In den Abbildungen 22-24 werden die Ergebnisse unter Verwendung des im Kapitel drei eingeführten Verbesserungsmaßes (3.1) dargestellt. Es werden die Verbesserungsmaße an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1 gezeigt.

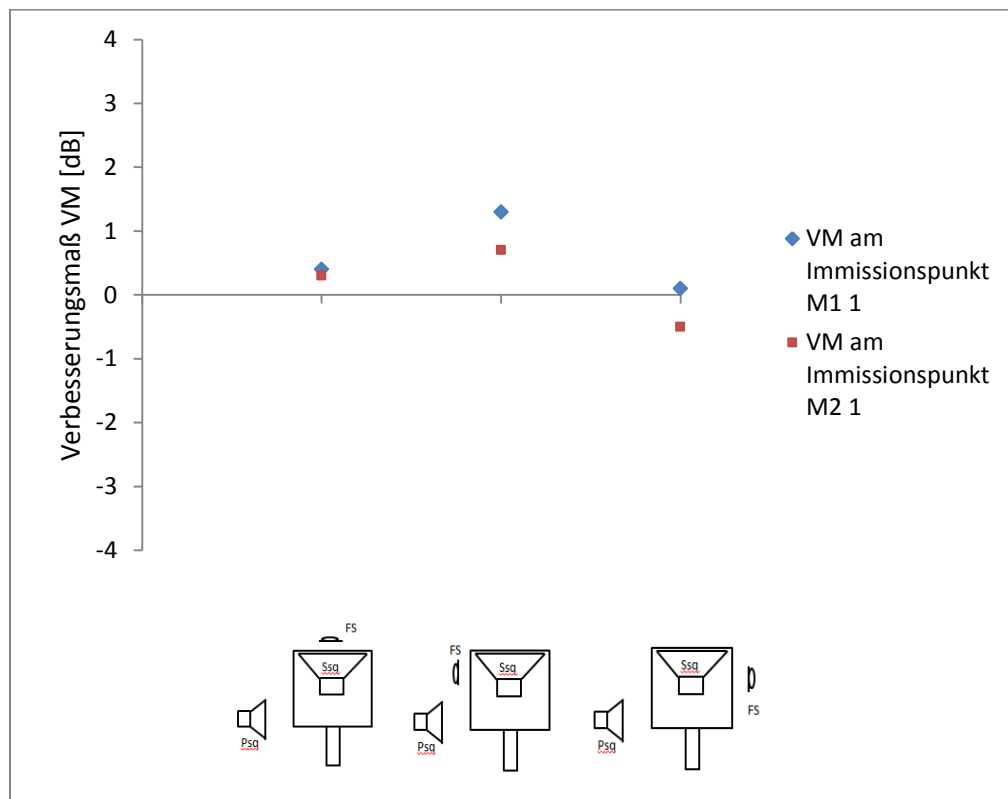


Abbildung 22: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1,  $f=125\text{Hz}$

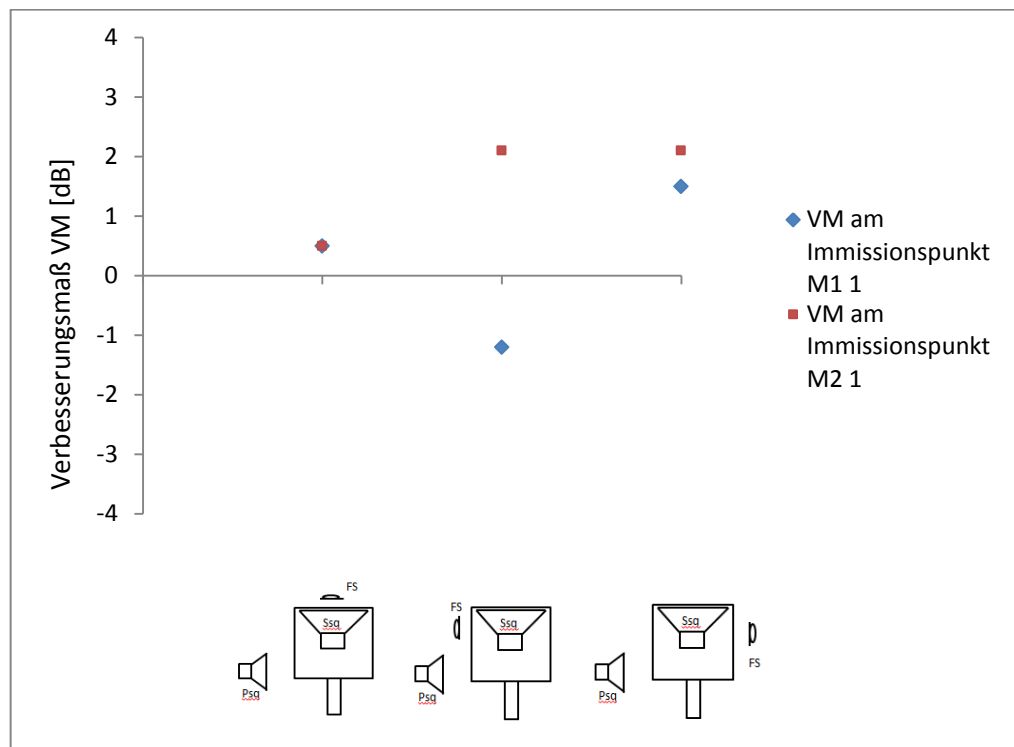


Abbildung 23: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1,  $f=250\text{Hz}$

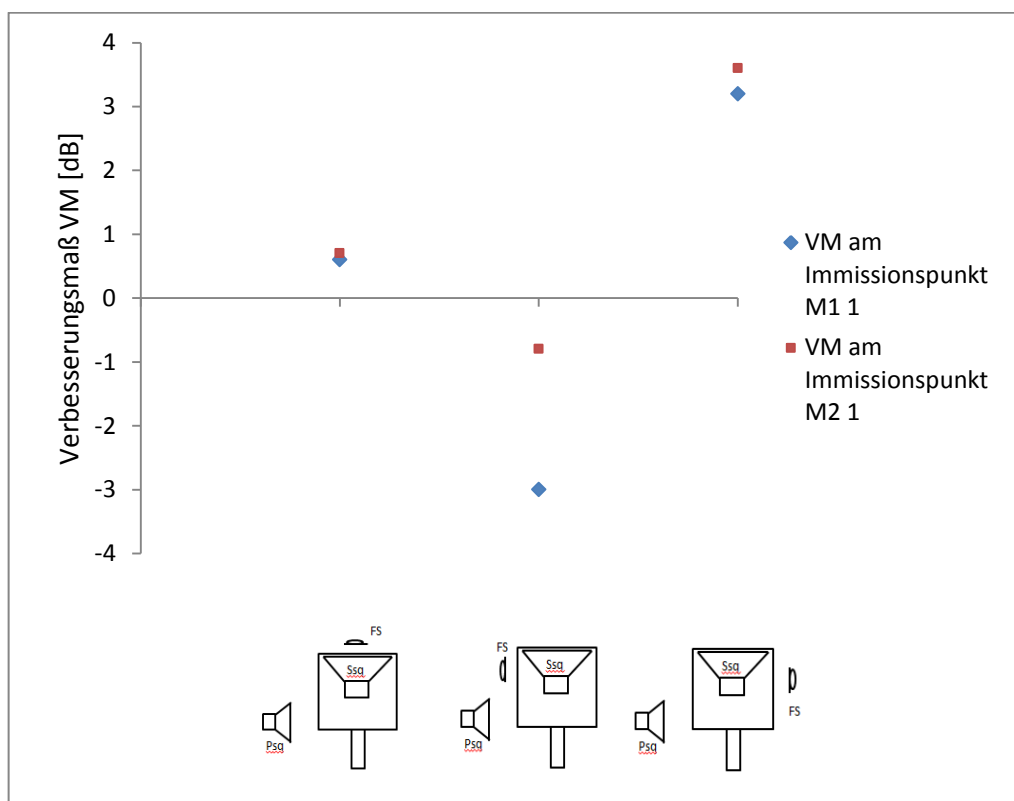


Abbildung 24: Verbesserungsmaß an den Immissionspunkten M1 1 und M2 1,  $f=500\text{Hz}$

Die Positionierung des Fehlermikrofons an der Messebene 1 führt an den betrachteten Immissionspunkten zu einem positiven Verbesserungsmaß, jedoch nehmen die Verbesserungsmaße keinen größeren Wert als 1 an. Die Messungen, die mit dem Fehlersensor auf der Aufsatzebene Richtung Primärschallquelle durchgeführt wurden, zeigen sowohl positive als auch negative Verbesserungsmaße auf. Es konnten Verbesserungsmaße um 4 dB bei einer Fehlermikrofonposition an der Aufsatzebene, die in Richtung Schattenzone zeigt, erzielt werden.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Anbringung des Fehlermikrofons an der Aufsatzebene 1 oder 3 die Abschirmwirkung einer aktiven Lärmschutzwand am effektivsten erhöhen kann. Somit ergeben sich sowohl Übereinstimmung mit Kohs [KOH04] als auch mit Schuberts [SCHUBERT11] Ergebnissen. In [SCHUBERT11] wurden die besten Verbesserungsmaße mit der Anbringung des Fehlersensors auf der Messebene 1 erzielt. Hinsichtlich dieser Positionierung konnte Koh [KOH04] ebenfalls eine positive Wirkung in den meisten untersuchten Immissionspunkten feststellen. Jedoch erwies sich in [KOH04] die Fehlermikrofonposition an der Aufsatzebene 3 als effektivere Variante. Die Verbesserungsmaße fielen für diesen Positionsfall höher aus. Dieses kann anhand der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse ebenfalls beobachtet werden.

## 5 Aktive Modellärmschutzwand unter Nutzung kommerziell erhältlicher ANC-Systeme

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen an der Modellärmschutzwand, deren Einfügungsdämpfung durch den Einbau von kommerziell erhältlichen Aktiv-Modulen erhöht werden soll, vorgestellt. Die Überprüfung der Wirkung des verwendeten Aktiv-Moduls wurde im ersten Kapitel dargestellt. Nach den Ausführungen im vorhergehenden Kapitel wird durch die Verwendung eines sekundären Schallfeldes an der Schallschirmkronen einer schallweichen Schirmoberkante nachgegangen. Grundsätzlich kann die Regelung des Aktiv-Moduls eines Abgasschalldämpfers eine schallweich oder schallhart Impedanzbedingung verfolgen. Im Falle einer schallharten Regelung wird ein sekundäres Schallfeld abgestrahlt, sodass sich am Fehlermikrofon ein Schalldruck  $p \rightarrow \infty$  einstellt. Dagegen verfolgt die schallweiche Regelung eine Schalldruckminimierung ( $p \rightarrow 0$ ) am Fehlermikrofon. Anhand der in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse ist generell eine Aussage über die Regelung des Aktiv-Moduls über den betrachteten Frequenzbereich nicht möglich. Der Verlauf des Schalldruckpegels  $\Delta L_{L,M}$  am Mikrofon 1, welches in der Nähe des Fehlermikrofons positioniert wurde, weist sowohl Schalldruckpegelerhöhungen ( $-\infty < \Delta L_{L,M} [\text{dB}] < 0$ ) als auch Schalldruckpegelvermindierungen auf ( $0 < \Delta L_{L,M} [\text{dB}] < \infty$ ).

### 5.1 Messaufbau und Ablauf der Messung

Die Untersuchung an der Modellärmschutzwand fand ebenfalls in einem semi-reflexionsarmen Raum ( $6,7 \times 4,3 \times 2,8 \text{ m}^3$ ) statt. In den Schallschirmkronenaufsatz wurden drei Aktiv-Module eingebaut (Abbildung 25). Die sekundäre Schallquelle und das Fehlermikrofon der Aktiv-Module wurden auf der Messebene 1 angebracht. Entscheidend für diese Positionierung des Fehlermikrofons war der Aspekt, das ANC-System in seiner ursprünglichen Anordnung zu belassen. Das Fehlermikrofon und die sekundäre Schallquelle sind im Abgasschalldämpfer auf einer Ebene angeordnet. Als Primärschall diente ein generiertes Rauschsignal. Es wurde an zwei Messpositionen eine Frequenzanalyse des Schalldruckpegels durchgeführt. Diese Messpositionen lagen in der Nähe des Schirmaufsatzes auf der Schallschirmschattenseite. In Abbildung 25 ist der Messaufbau grafisch dargestellt. Das verwendete Equipment ist aus dem Anhang A-6 zu entnehmen. Die Messung erfolgte in Terzbändern und die Messzeit  $t$  einer Messung betrug zehn Sekunden. Zunächst wurde eine Messung mit ausgeschalteten und dann mit eingeschalteten Aktiv-Modulen durchgeführt. Dieser Ablauf wurde zehnmal wiederholt. Die Messungen mit eingeschalteten sowie die Messungen mit ausgeschalteten Aktiv-Modulen wurden jeweils energetisch gemittelt.

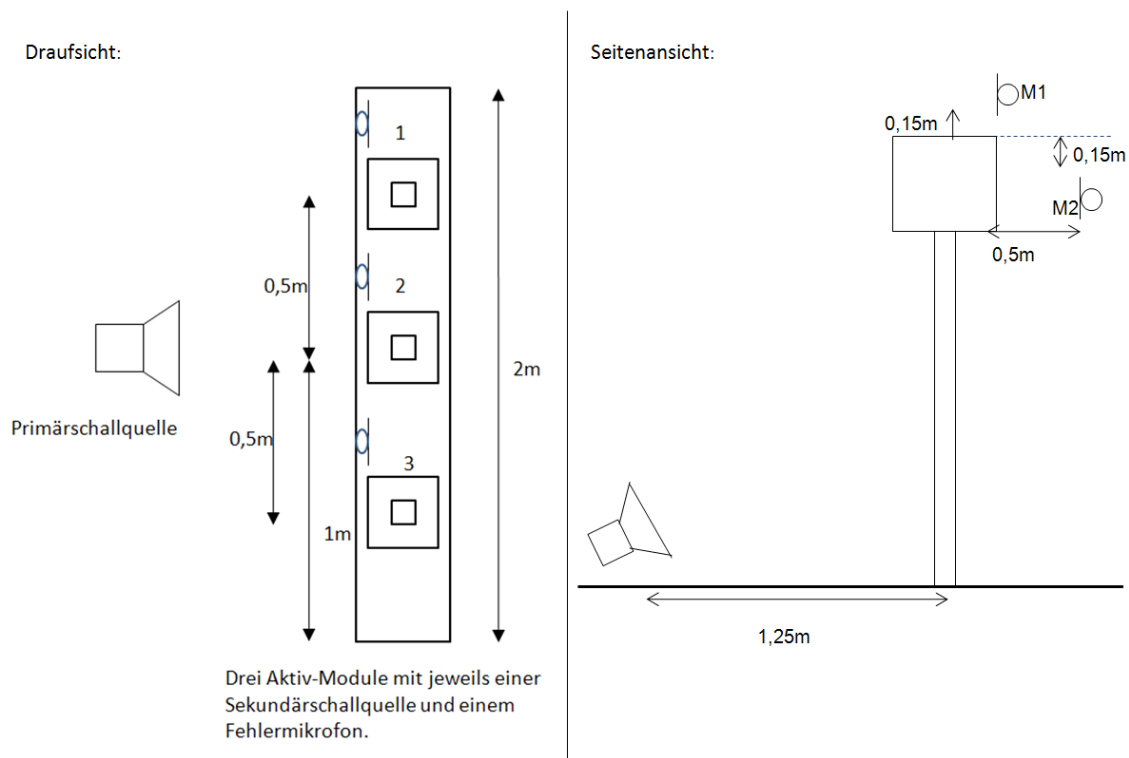


Abbildung 25: Draufsicht auf Schallschirmaufsatz mit den drei Aktiv-Modulen und der Anordnung der Sekundärschallquellen und Fehlermikrofonen (links); Seitenansicht des Messaufbaus (rechts)

## 5.2 Messergebnisse

In der Abbildung 26 sind die Messergebnisse in Form des Verbesserungsmaßes dargestellt. Es konnten keine signifikanten Verbesserungsmaße erzielt werden. Mit Ausnahme des Frequenzbereiches  $f = 800 - 1250$  Hz wurden Verbesserungsmaße in dem Wertebereich  $-1 < VM [dB] < 1$  gemessen. In Anbetracht eines angenommenen Messfehlers von ungefähr  $0,5 - 1$  dB, kann hinsichtlich der Wirkung der in die Modelllärmschutzwand integrierten ANC-Systeme die Aussage getroffen werden, dass unter Nutzung dieser ausgewählten ANC-Systeme die Einfügungsdämpfung der Modelllärmschutzwand nicht beeinflusst werden konnte. Bei dem Vergleich der Abbildung 26 mit den Messergebnissen der Dämpfungsfunktion des Aktiv-Resonators aus dem Kapitel „Funktionsüberprüfung des aktiven Abgasschalldämpfers“ (Abbildung 7) können keine Analogien zwischen dem Frequenzspektrum der Regelung des Aktiv-Resonators (Impedanzbedingung: schallhart/schallweich) und dem Frequenzspektrum des Verbesserungsmaßes der Modelllärmschutzwand gefunden werden. Lediglich der bei der Frequenz  $f = 1250$  Hz auftretende Peak ist in den Abbildungen 26 und 7 deutlich erkennbar. Das weist auf einen eventuellen hardwareseitigen oder softwareseitigen Einfluss der ANC-Systeme hin.



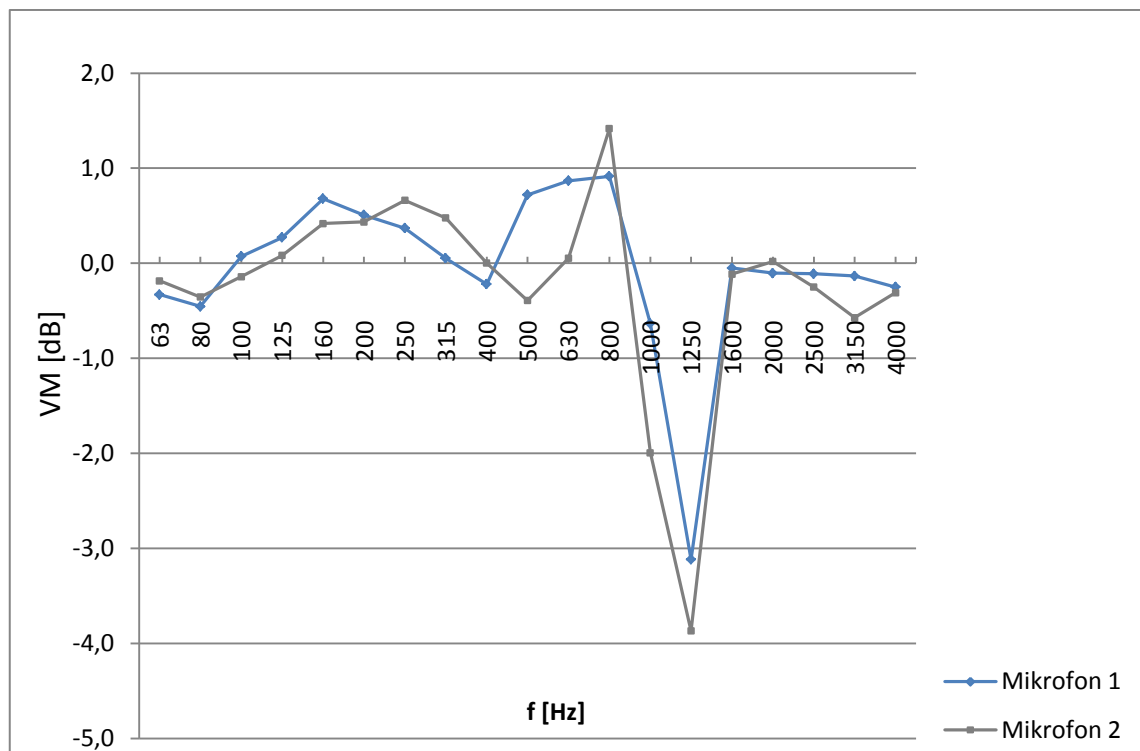


Abbildung 26: Frequenzverlauf des Verbesserungsmaßes an Messmikrofonen 1 und 2



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, die Einfügungsdämpfung einer Lärmschutzwand zu erhöhen, indem ein kommerziell erhältliches ANC-System in eine Lärmschutzwand integriert wurde. Es wurde ein ANC-System verwendet, welches ursprünglich als ein an einem Abgasschalldämpfer seitlich aufgesetztes Aktiv-Modul eingesetzt wird. Zunächst fand eine Funktionsüberprüfung des ANC-Systems im Abgasschalldämpfer statt. Diese erfolgte durch die messtechnische Ermittlung der Schalldruckpegelminderung bei eingeschaltetem Aktiv-Modul gegenüber ausgeschaltetem Aktiv-Modul. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei sehr tiefen Frequenzen  $f < 160$  Hz der Schalldruckpegel bei Einsatz des ANC-Systems um bis zu 5 dB gemindert werden kann. Im Frequenzbereich  $f = 160 - 400$  Hz wurde eine Erhöhung des Schalldruckpegels durch das eingeschaltete ANC-System ermittelt. Zudem wurde festgestellt, dass oberhalb einer Frequenz von  $f = 1600$  Hz das ANC-System keine Wirkung zeigt. Anhand dieser Messung konnte nicht geklärt werden, nach welchem Regelungs-Prinzip (Impedanzbedingung: schallweich/schallhart) das ANC-System arbeitet. Nachfragen beim Hersteller des Abgasschalldämpfers erbrachten ebenfalls keine Antworten auf die Frage, wie das Aktiv-Modul arbeitet.

Während der Literaturrecherche über aktive Lärmschutzwände kristallisierte sich die Problematik der optimalen Positionierung des Fehlermikrofons und der sekundären Schallquelle heraus. Die Wissenschaftler Koh und Schubert widmeten sich in ihren Arbeiten [KOH04] und [Schubert11] ausführlich dem Thema einer optimalen Positionierung an der Schallschirmkrone. Hinsichtlich der bestmöglichen Positionierung der sekundären Schallquelle kamen die Untersuchungen von Koh und Schubert auf das gleiche Ergebnis. Aus diesem Grund sollte bei einer erneuten Untersuchung an einer aktiven Lärmschutzwand eine Verifizierung der optimalen Position des Fehlermikrofons vorgenommen werden. Mit dem nach oben abstrahlenden sekundären Schallfeld (aus der Messebene 1) erwies sich die Position des Fehlermikrofons an der Schirmaufsatzseite in Richtung Immissionspunkte (Messebene 3) als wirksamste Position. Es konnten Verbesserungsmaße bis zu 4 dB gemessen werden. Eine Positionierung auf dem Schirmaufsatz (Messebene 1) erzielte ebenfalls positive Ergebnisse, jedoch fielen die Extra-Einfügungsdämpfungen geringer aus, als im Fall der Fehlersensorpositionierung auf der Messebene 3.

Die Untersuchung der aktiven Modelllärmschutzwand, die mittels kommerzieller ANC-Systeme betrieben wurde, konnte keine Extra- Einfügungsdämpfungen nachweisen. Die Erhöhung der Einfügungsdämpfung durch den Einsatz von ANC-Systemen in einem Schallschirmaufsatz beruht auf dem Prinzip einer Beeinflussung der Schallbeugung in die Schattenseite durch eine schallweiche Schallschirmoberkante. Die

erwünschte Erhöhung der Einfügungsdämpfung der Modelllärmschutzwand blieb bei dem Versuch aus. In Voruntersuchungen, die im Freien mit der aktiven Modelllärmschutzwand durchgeführt wurden, konnten ebenfalls keine Verbesserungsmaße nachgewiesen werden. Die erforderliche schallweiche Impedanzbedingung an der Schallschirmkrone konnte mittels des ausgewählten kommerziellen ANC-Systems in dieser Untersuchung nicht realisiert werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass das ANC-System auf den Einsatzbereich-Abgasschalldämpfer optimiert ist und somit Amplituden-, Frequenzverhalten und Phasen-Regelbereich auf das Abgasschalldämpfersystem eingestellt ist. Bevor weitere Untersuchungen an der Lärmschutzwand durchgeführt werden, sollten diese Eigenschaften des Aktiv-Moduls noch einmal genauer betrachtet werden. Eine weitere Messung zur Funktionsüberprüfung des aktiven Abgasschalldämpfers könnte durch die Benutzung eines Sinus-Sweeps erfolgen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung an der Lärmschutzwand deutet darauf hin, dass der Einsatz des ausgewählten kommerziellen ANC-Systems an der Modelllärmschutzwand, für die Erhöhung der Einfügungsdämpfung der Lärmschutzwand, nicht geeignet ist.

## Literaturverzeichnis

[BERKHOFF05] Berkhoff, A.P.: Control strategies for active noise barriers using near-field error sensing. J Acoust Soc Am (2005); 118(3): S. 1469-79

[BMVBS] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Lärmvorsorge und Lärmsanierung. URL: <<http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/laermvorsorge-und-laermsanierung.html>>, verfügbar am 15.03.2012

[DIN 18005] DIN 18005-1: Schallschutz im Städtebau. Juli 2002

[DIN 7235] DIN EN ISO 7235: Akustik- Labormessungen an Schalldämpfern in Kanälen- Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust. Januar 2010

[DIN 9613] DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Oktober 1999

[DUHAMEL97] Duhamel, Denis; Sergent Phillipe; Hua, Chonghue; Cintra, Daniel: Measurement of Active Control Efficiency Around Noise Barriers. Applied Acoustics (1997); 55(3) : 217-41

[FIB] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Technischer Schallschutz: Aktive Schalldämpfer. URL:< <http://www2.ibp.fraunhofer.de/akustik/ts/aktive/aktivsd/index.html>>, verfügbar am 13.04.2012

[FUCHS07] Fuchs, Helmut V.: Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen. – 2. Aufl. Heidelberg : 2007, Springer

[GUO98] Guo, Jingnan; Pan, Jie: Increasing the insertion loss of noise barriers using an active-control system. J Acoust Soc Am (1998); 104(6): S. 4408-15

[HENN08] Henn, Hermann; Sinambari, Gh. Reza; Fallen, Manfred: Ingenieurakustik : Physikalische Grundlage und Anwendungsbeispiele.-4.Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008

[KOH04] M.A. Hyo-In Koh: Aktiv verbesserte Aufsätze für Schallschutzwände. -2004. - 110 S. Berlin, Technische Universität, Fakultät III – Prozesswissenschaften, Dissertation, 2004

[KUENZEL04] Künzel, K.; Schulz, D.: Wissensspeicher Akustik.- Mittweida : 2004

[KURZE71] Kurze, U.J.: Sound attenuation by screens. Applied Acoustics (1971); 4(197) S. 35-53

[LAM94] Lam, Y. W.: Using Maekawa`s Charts to Calculated Finite Length Barriers Insertion loss. Applied Acoustics (1994); (1)

[LIU08] Liu, Jacob Chia-chun; Niu, Feng: Study on the analogy feedback active soft edge noise barrier. Applied Acoustics (2008); 69: S. 728-32

[MAEKAWA68] Maekawa, Z.: Noise Reduction by Screens. Applied Acoustics (1968); 1

[MUELLER04] Müller, Gerhard; Möser, Michael: Taschenbuch der Akustik.- 3.Aufl. – Heidelberg : Springer, 2004

[MOESER95] Möser, M.: Die Wirkung von zylindrischen Aufsätzen an Schallschirmen. ACUSTICA (1995); 81: S. 565-86

[MOESER07] Möser, Michael: Technische Akustik. – 7.Aufl. – Heidelberg : Springer, 2007

[NIU06] Niu, Feng; Zou, Haishan; Qui, Xiaojun, Wu, Ming: Error sensor location optimization for active soft edge noise barrier. J of Sound and Vibration (2007); 299: S. 409-17

[OMOTO93] Omoto, A. ; Fujiwara, K.: A study of an actively controlled noise barrier. J Acoust Soc Am (1993); 94(4): 2173-79

[OMOTO97] Omoto, A. ; Takashima, K.; Fujiwara, K.: Active suppression of sound diffracted by a barrier: An outdoor experiment. J Acoust Soc Am (1997); 102(3): S.1671-79

[RLS 90] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen.1990

[SCHIRMER06] Schirmer, Werner: Technischer Lärmschutz : Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen. – 2.Aufl. – Heidelberg : Springer, 2006

[SCHUBERT11] Hübelt, Jörn; Schubert, Stefan: Minderung des Verkehrslärms durch den Einsatz aktiver Lärmschutzwände für Anwendung im Straßen- und Schienenverkehr. – 2011. – Mittweida, University of Applied Sciences, Lehrstuhl für technische Mechanik und Akustik

[SHAO97] Shao, J. ; Sha, J.-Z. ; Zhang, Z.-L.: The method of the minimum sum of squared acoustic pressures in actively controlled noise barrier. J of Sound and Vibration (1997); 204(2): S. 381-85

[SKTECHAK] Hübelt, Jörn: Anschauungsmaterial zur Vorlesung Technische Akustik: Vorlesung LSW1.- 2009. – Mittweida, University of Applied Sciences

[TARABINI07] Tarabini, Marco; Roure, Alain: Modeling of influencing parameters in active noise control on an enclosure wall. J of Sound and Vibration (2007); 311: S. 1325-39

[VDI2720] Norm VDI 2720-1: Schallschutz durch Abschirmung im Freien. März 1997





# Anlagen

## **A-1 Verwendetes Equipment der Funktionsüberprüfungsmessung des Abgasschalldämpfers.**

Messgegenstand:	Aktiver Abgasschalldämpfer
Messkanal:	Kanalgrundrohr
Messmikrofon 1 und 2:	B&K Mikrofon Typ 4190 (Kalibrator von B&K Typ 4231)
Analysator:	B&K Typ2144
Generator:	Minirator MR 1
Verstärker:	Stero Amplifier Model PA-940 von Mc Crypt

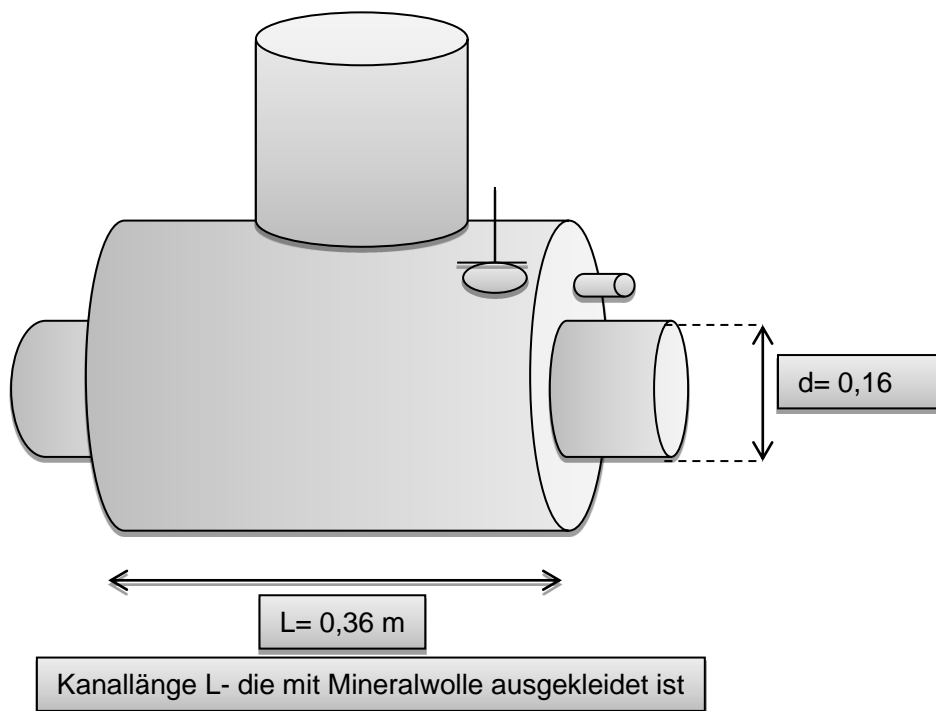
**A-2 Abmessungen des Aktiv-Abgasschalldämpfers**

Abbildung A-2 1: Abmessungen des Abgasschalldämpfers

### A-3 Schallausbreitungswege an einem Schallschirm

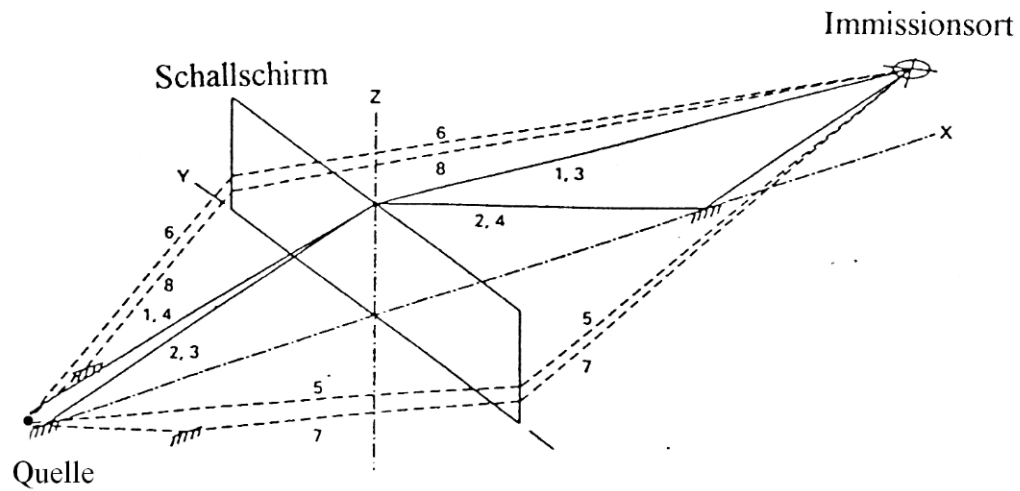


Abbildung A-3 1: Acht verschiedene Ausbreitungswege des Schalls von der Quelle zum Immissionsort. Zur Vereinfachungen werden die Schallwellen als Strahlen betrachtet.[SKTECHAK]

#### A- 4 Versuchsanordnungen der Forschungsarbeiten

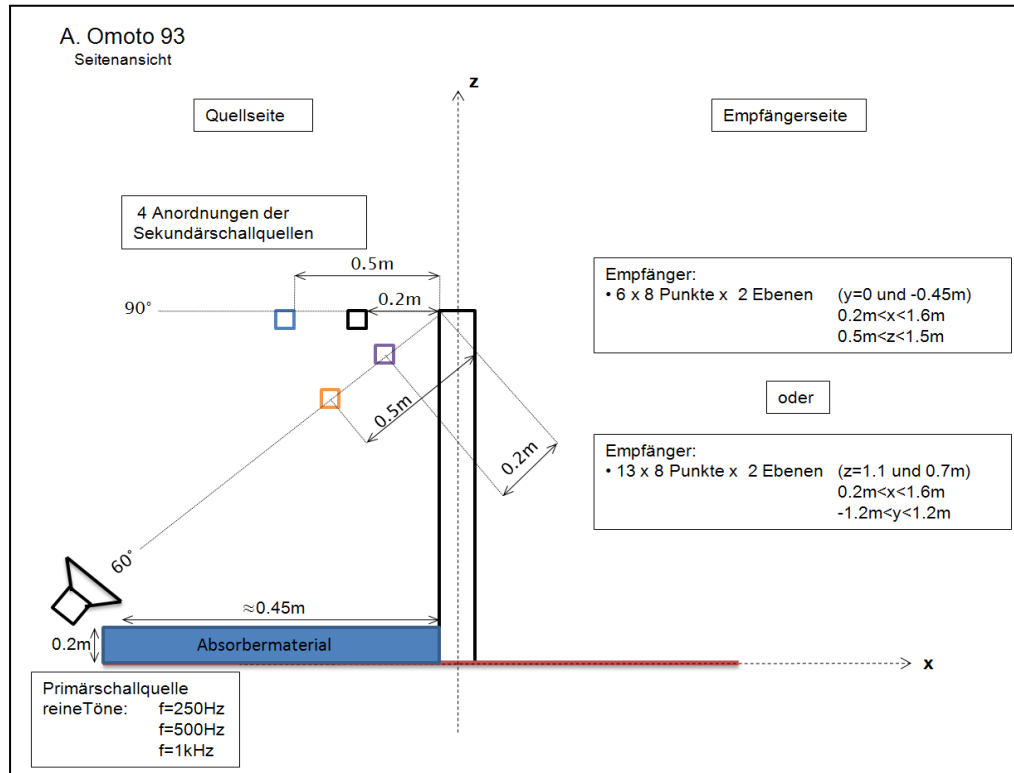


Abbildung A-4 1: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus A. Omoto's Forschungsarbeit von 1993

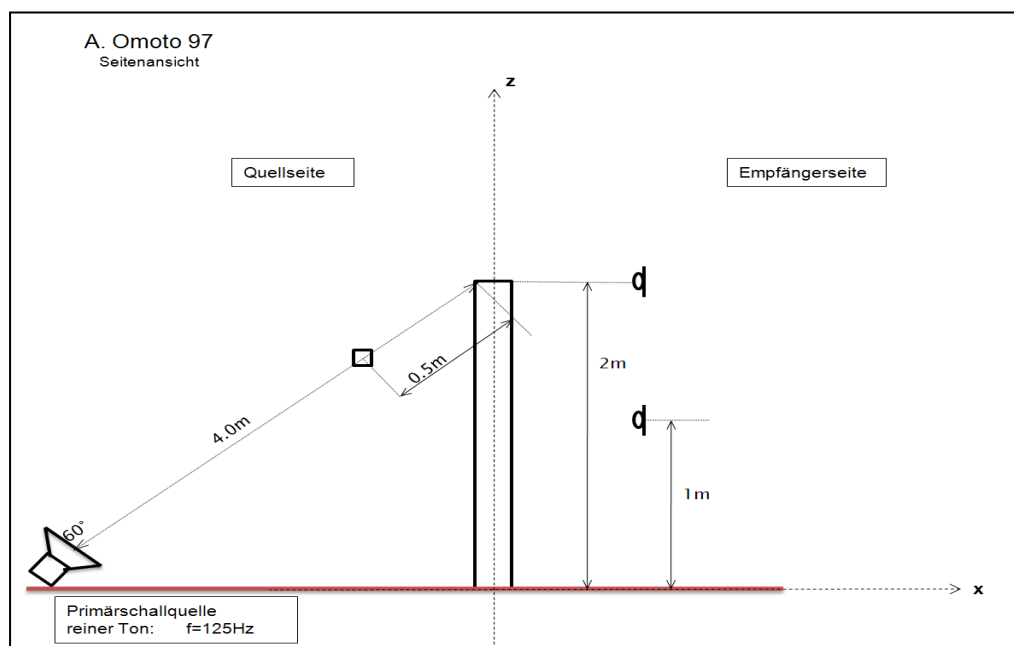


Abbildung A-4 2: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus A. Omoto's Forschungsarbeit 1997( Experiment1)

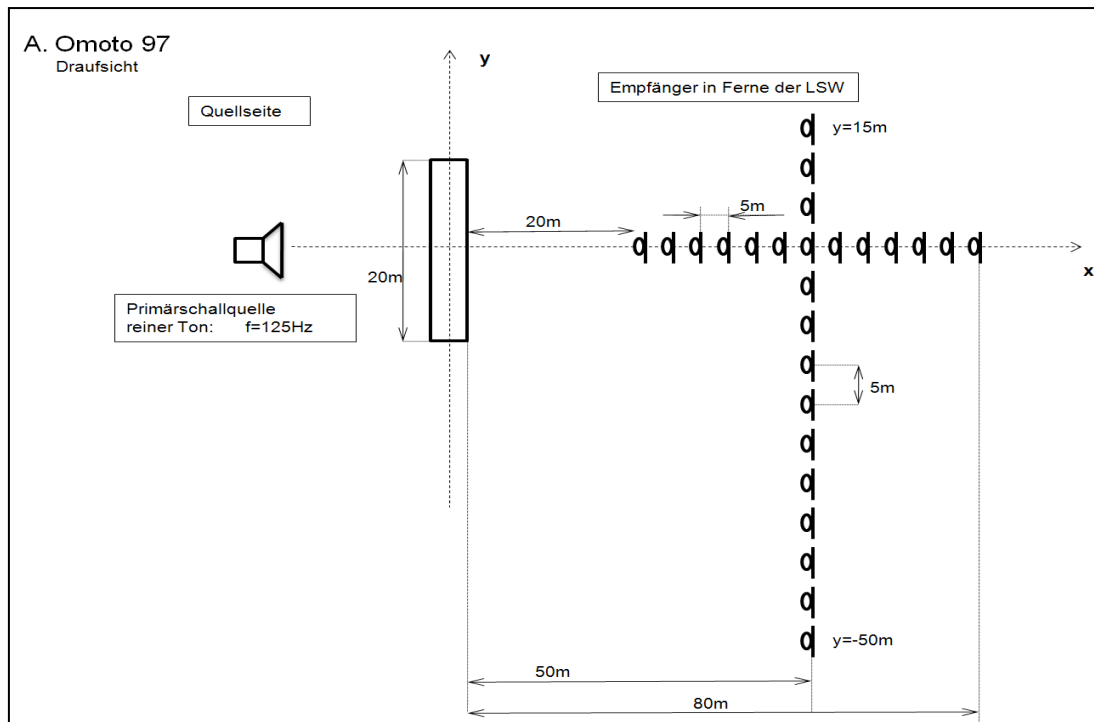


Abbildung A-4 3: Versuchsaufbau aus A. Omoto's Forschungsarbeit 1997( Experiment1) mit Empfängern in der Ferne der LSW

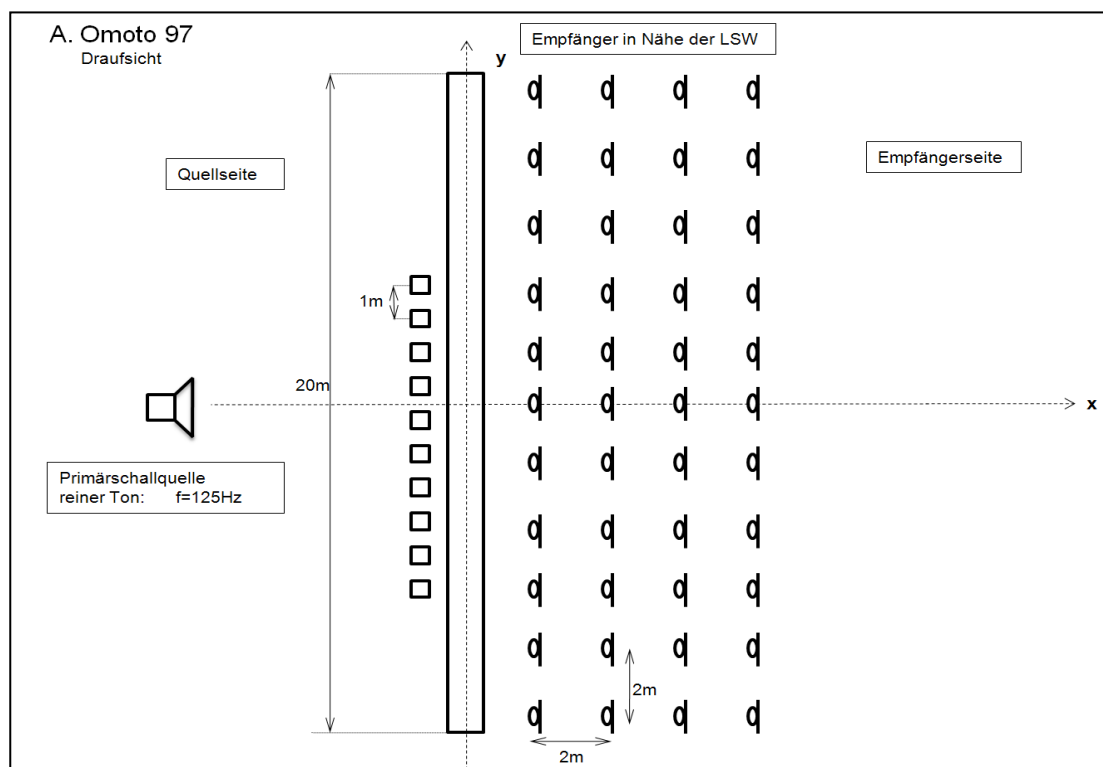


Abbildung A-4 4: Versuchsaufbau aus A. Omoto's Forschungsarbeit 1997( Experiment1) mit Empfängern in Nähe der LSW

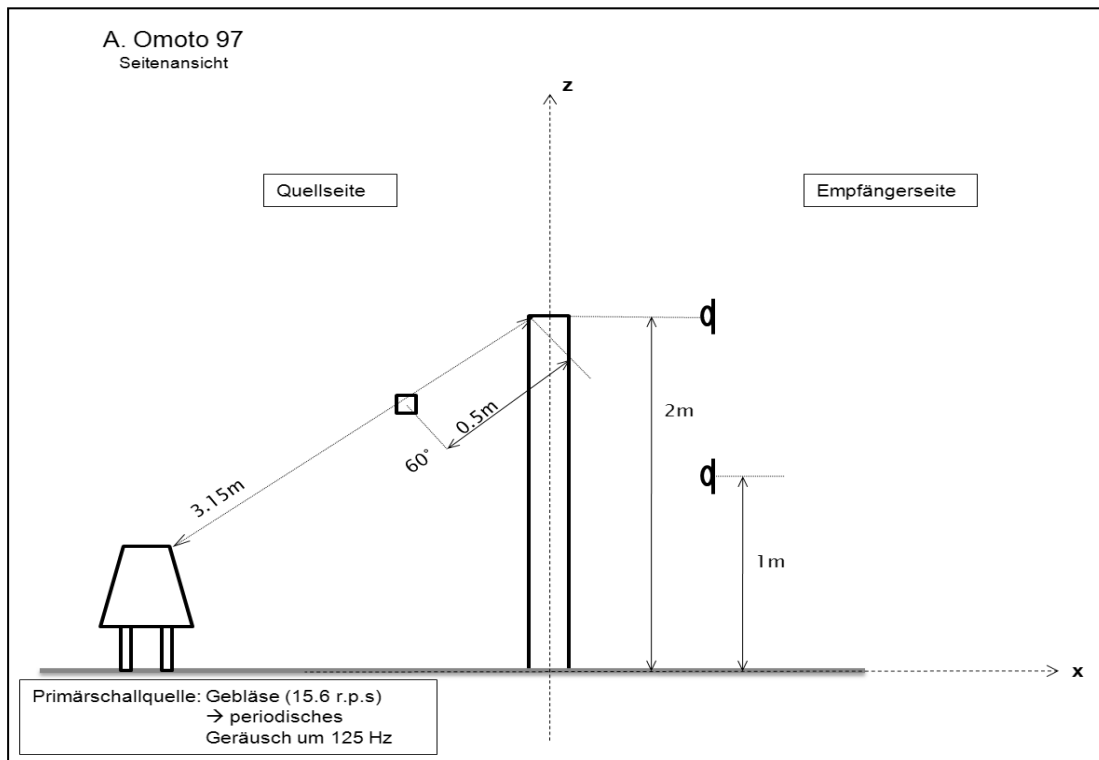


Abbildung A-4 5: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus A. Omoto`s Forschungsarbeit 1997(Experiment2)

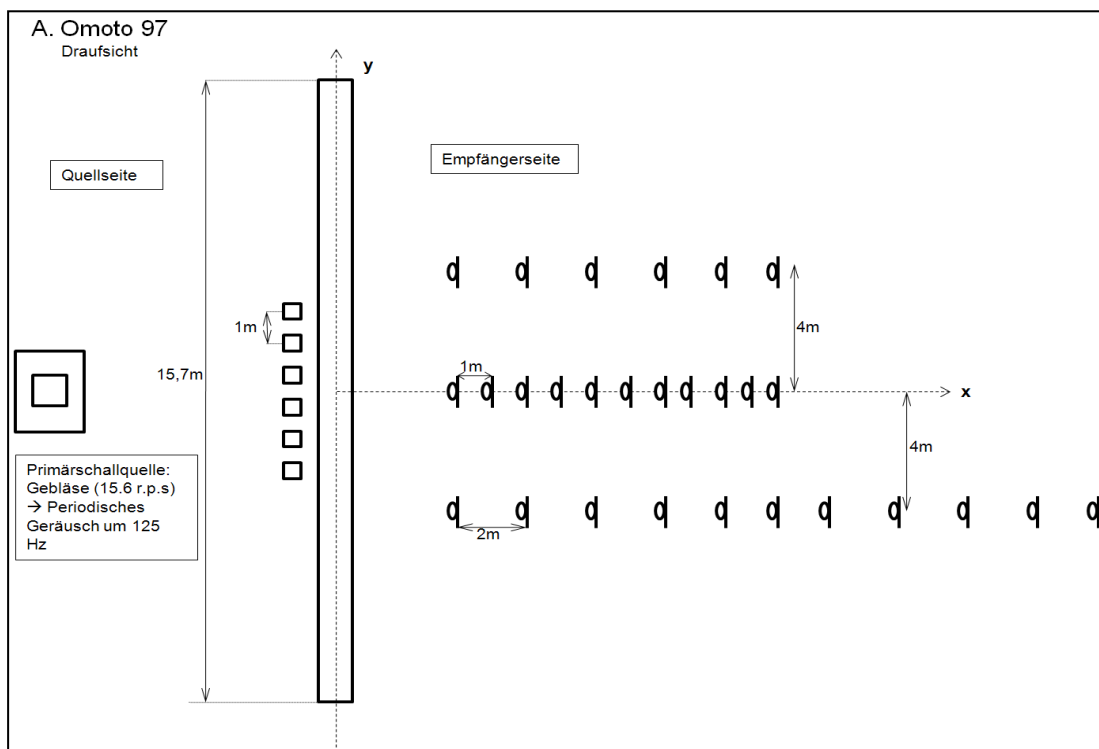


Abbildung A-4 6: Draufsicht des Versuchsaufbaus aus A. Omoto's Forschungsarbeit 1997(Experiment2)

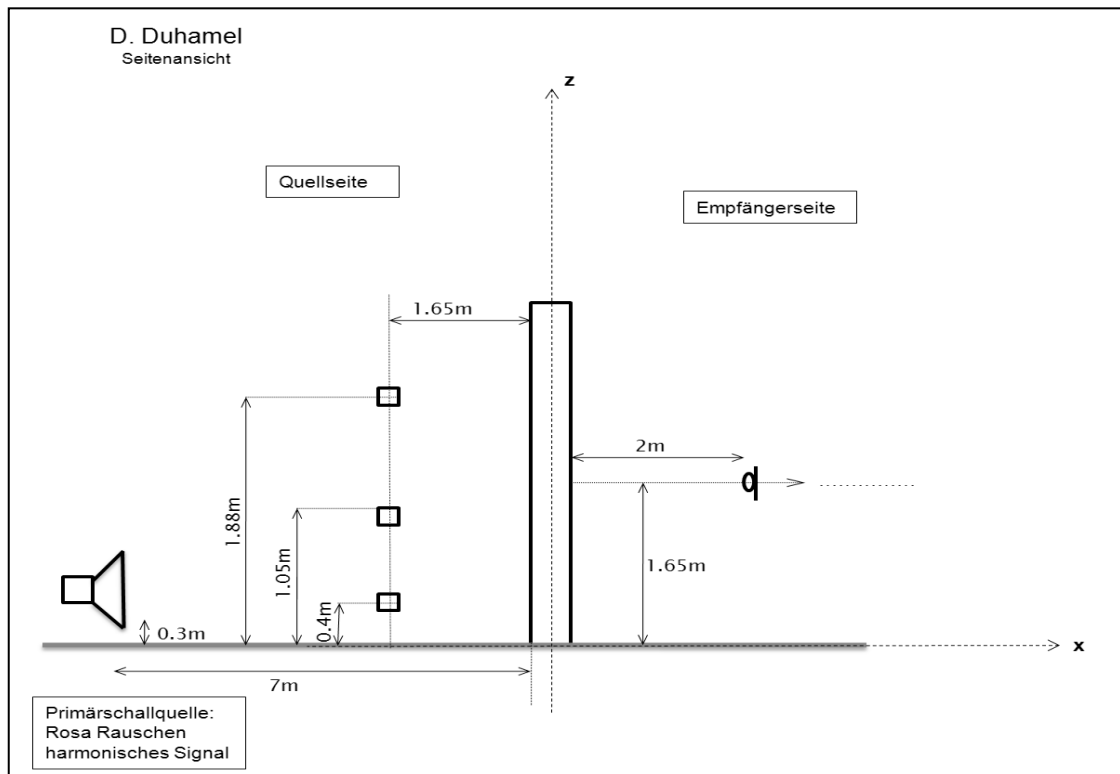


Abbildung A-4 7: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus D. Duhamel's Forschungsarbeit

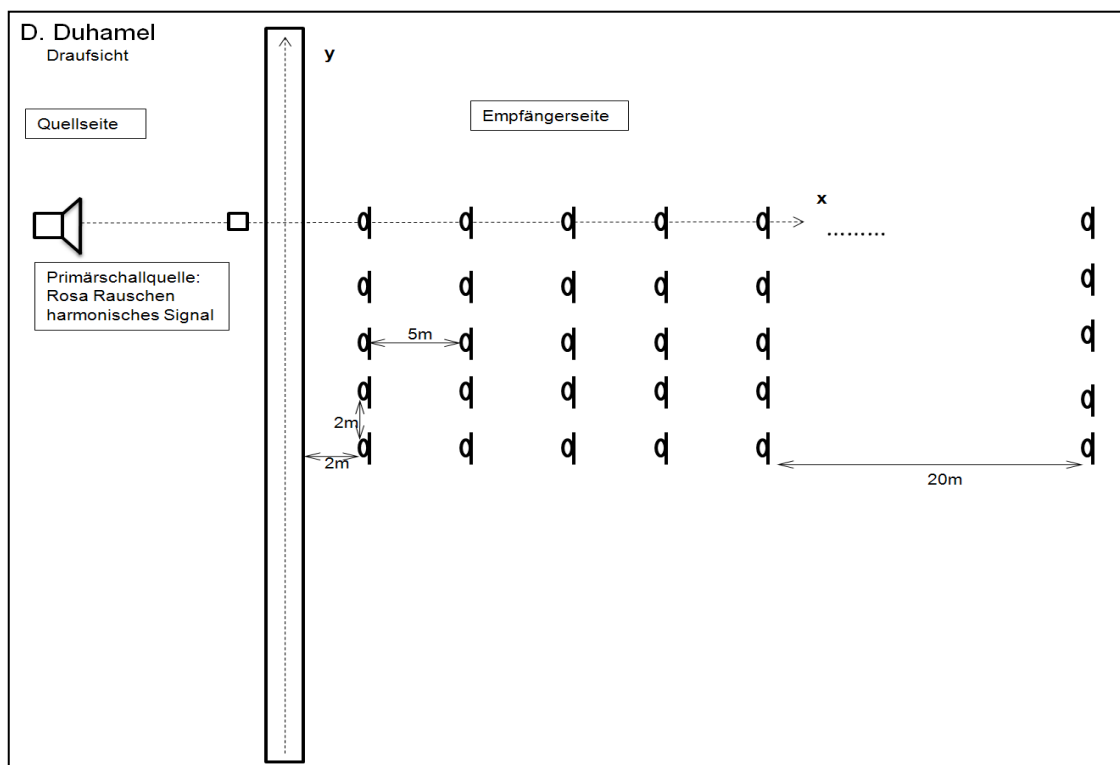


Abbildung A-4 8: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus D. Duhamel's Forschungsarbeit

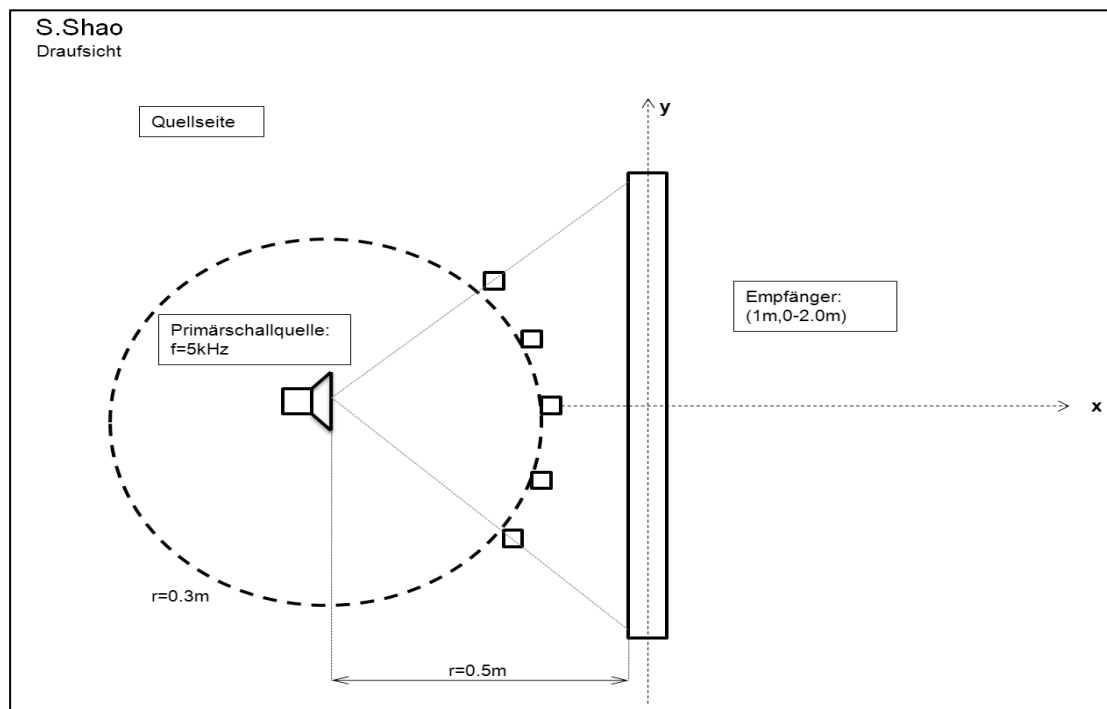


Abbildung A-4 9: Versuchsaufbau von S. Shaos Forschungsarbeit

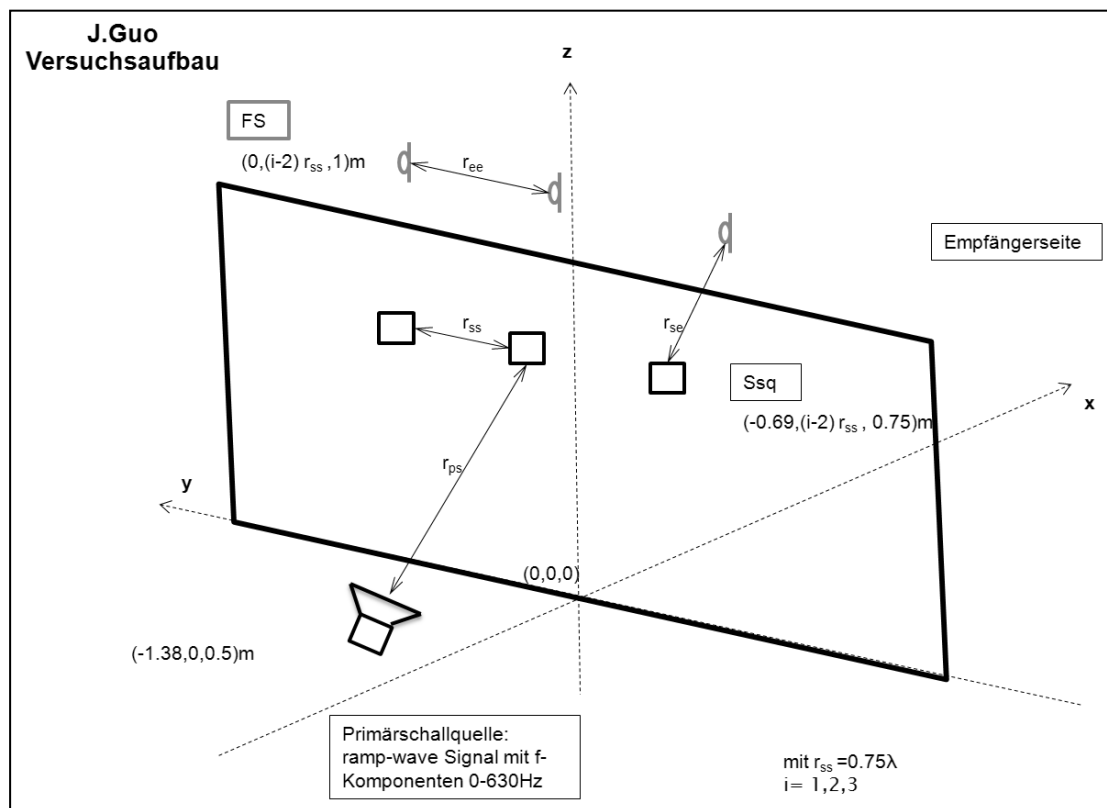


Abbildung A-4 10: Versuchsaufbau von J. Guo Forschungsarbeit



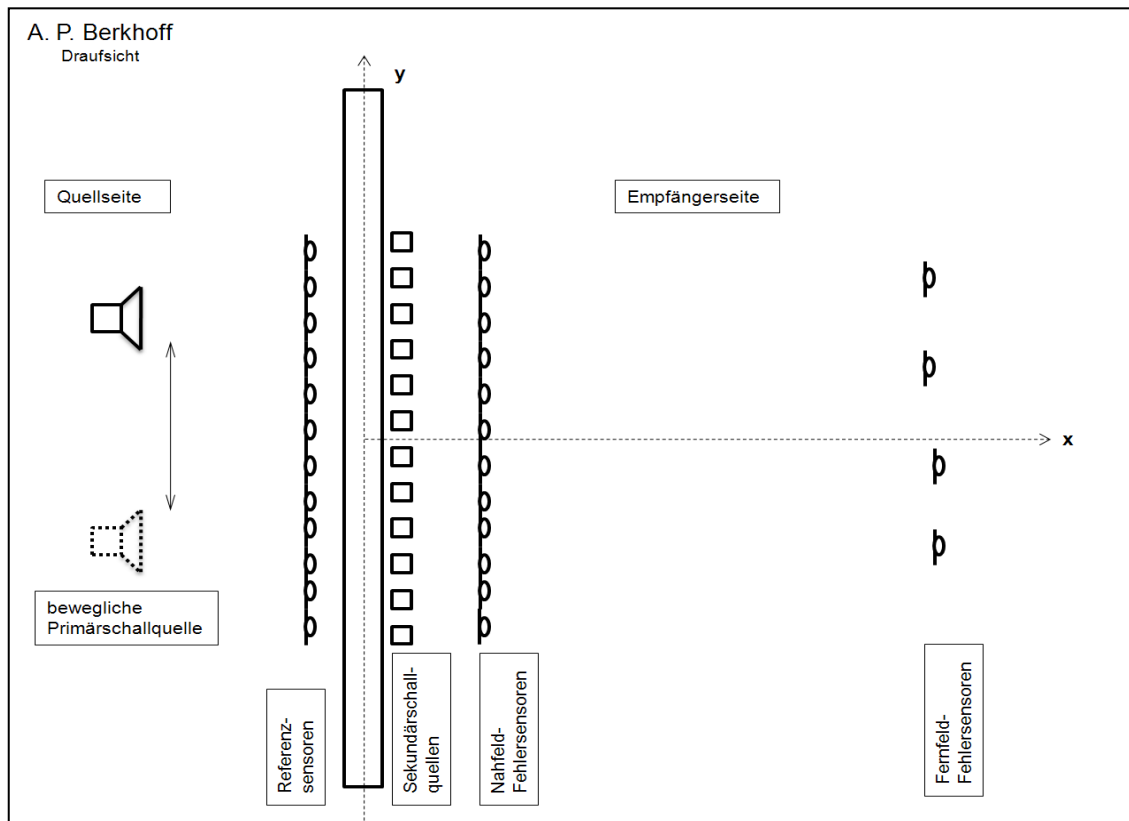


Abbildung A-4 11: Versuchsaufbau von A. P. Berkhoff Forschungsarbeit

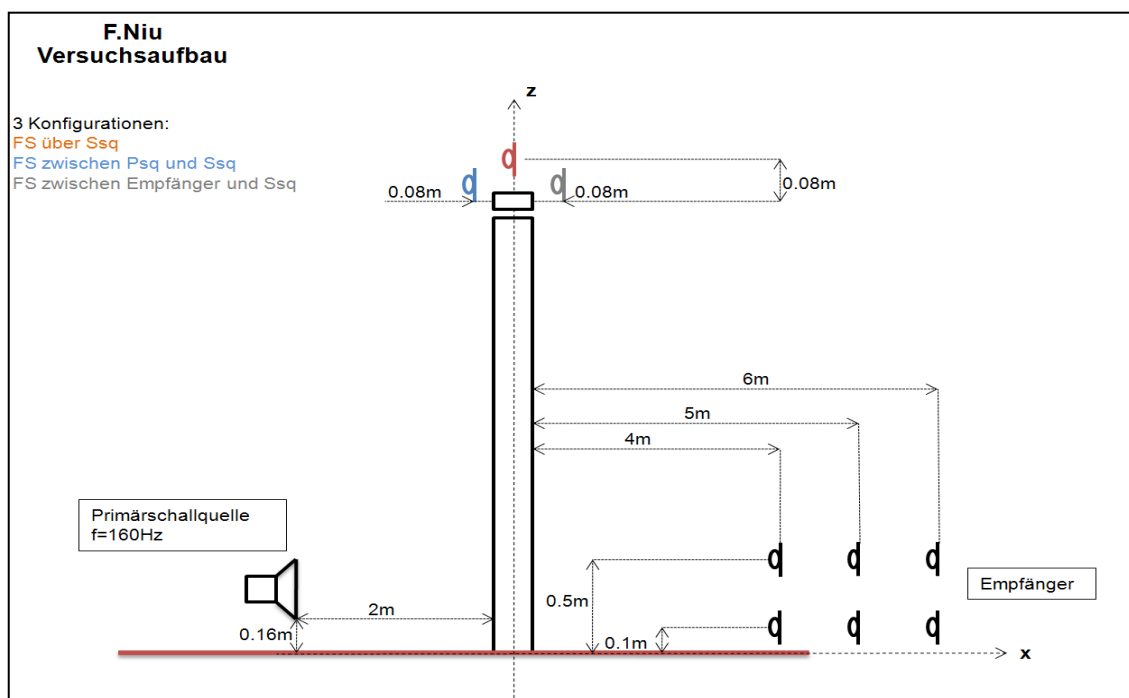


Abbildung A-4 12: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus F. Niu's Forschungsarbeit

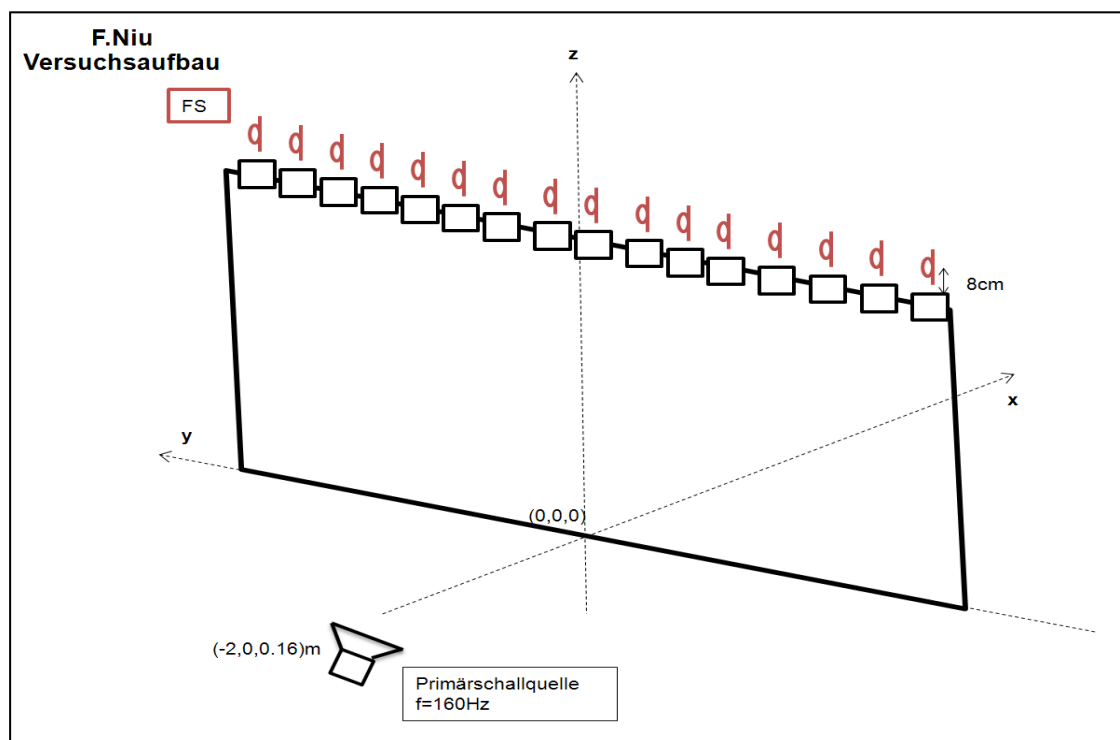


Abbildung A-4 13: Versuchsaufbau aus F. Niu Forschungsarbeit

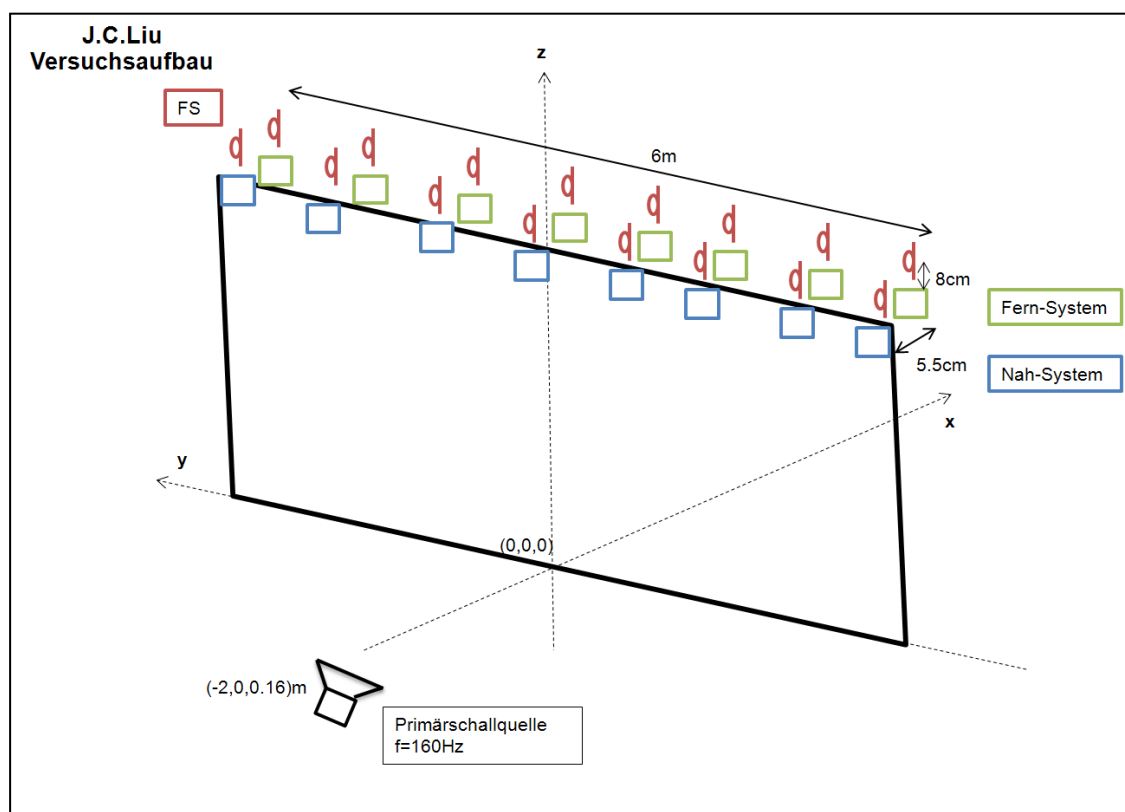


Abbildung A-4 14: Versuchsaufbau aus J. C. Liu's Forschungsarbeit

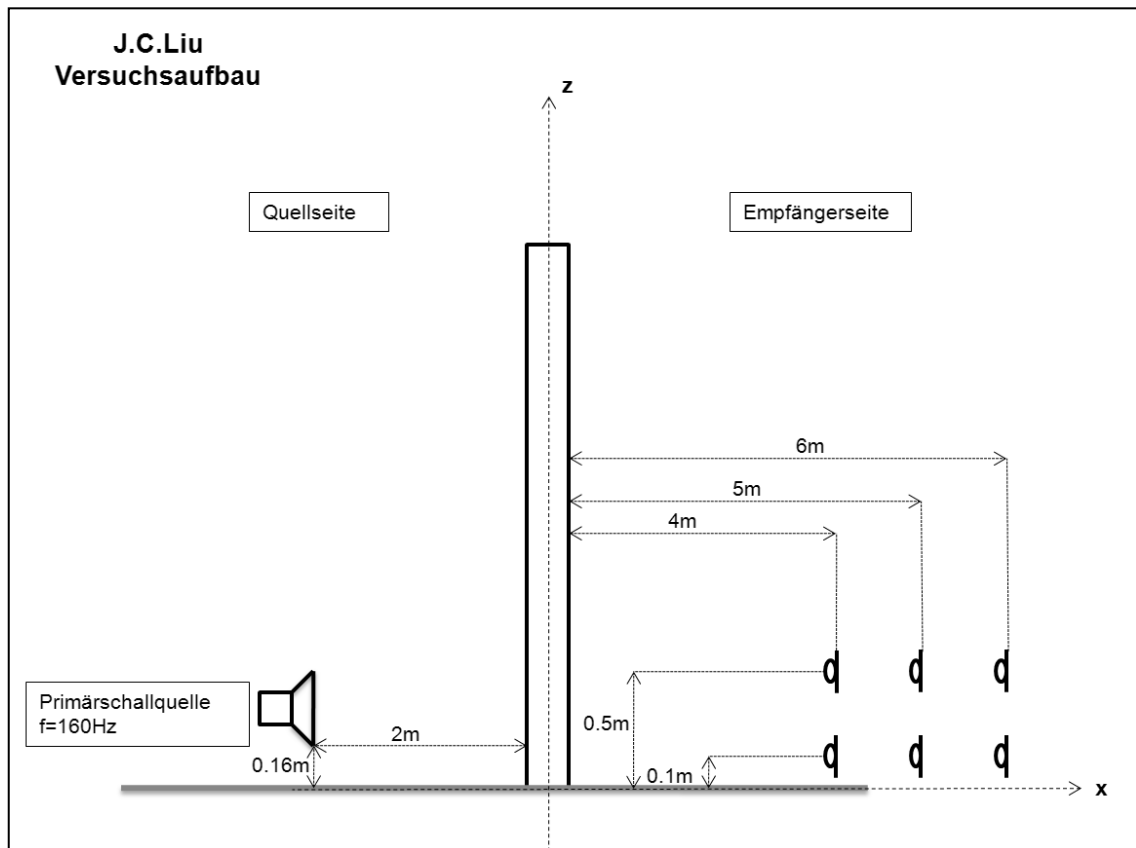


Abbildung A-4 15: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus J. C. Liu Forschungsarbeit

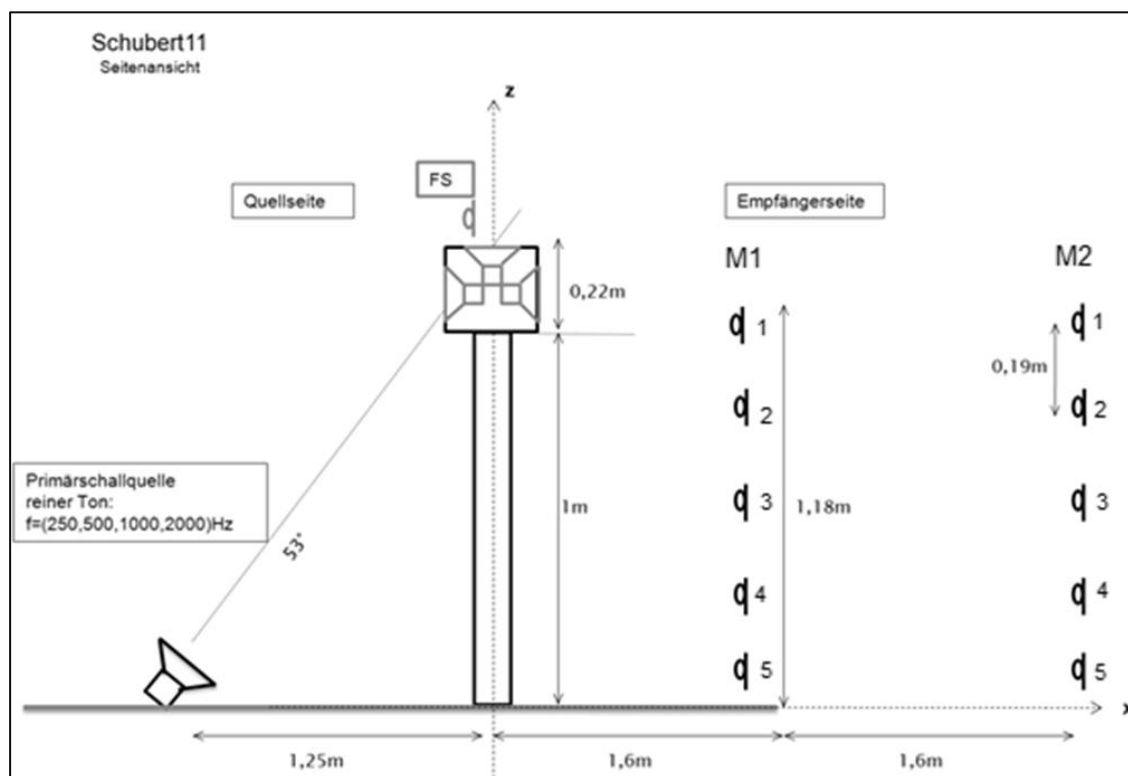


Abbildung A-4 16: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus Schuberts Forschungsarbeit

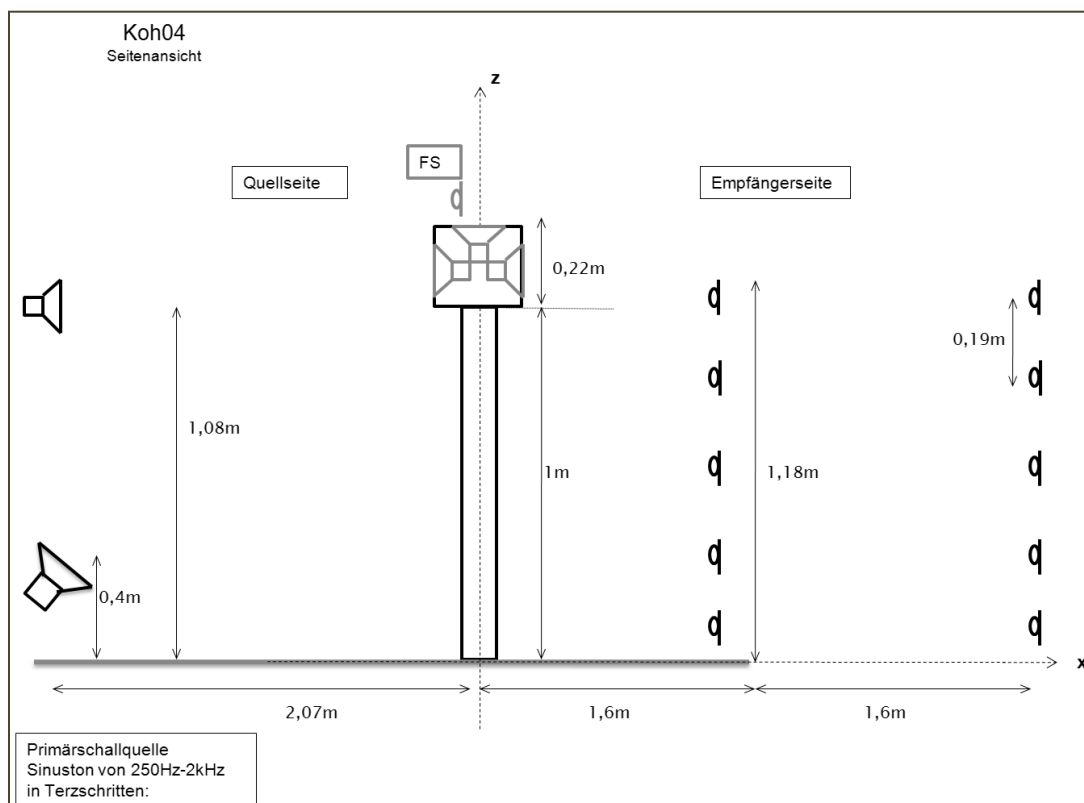


Abbildung A-4 17: Seitenansicht des Versuchsaufbaus aus Kohs Forschungsarbeit

## A-5 Schalldruckpegelverlauf an den Messmikrofonen

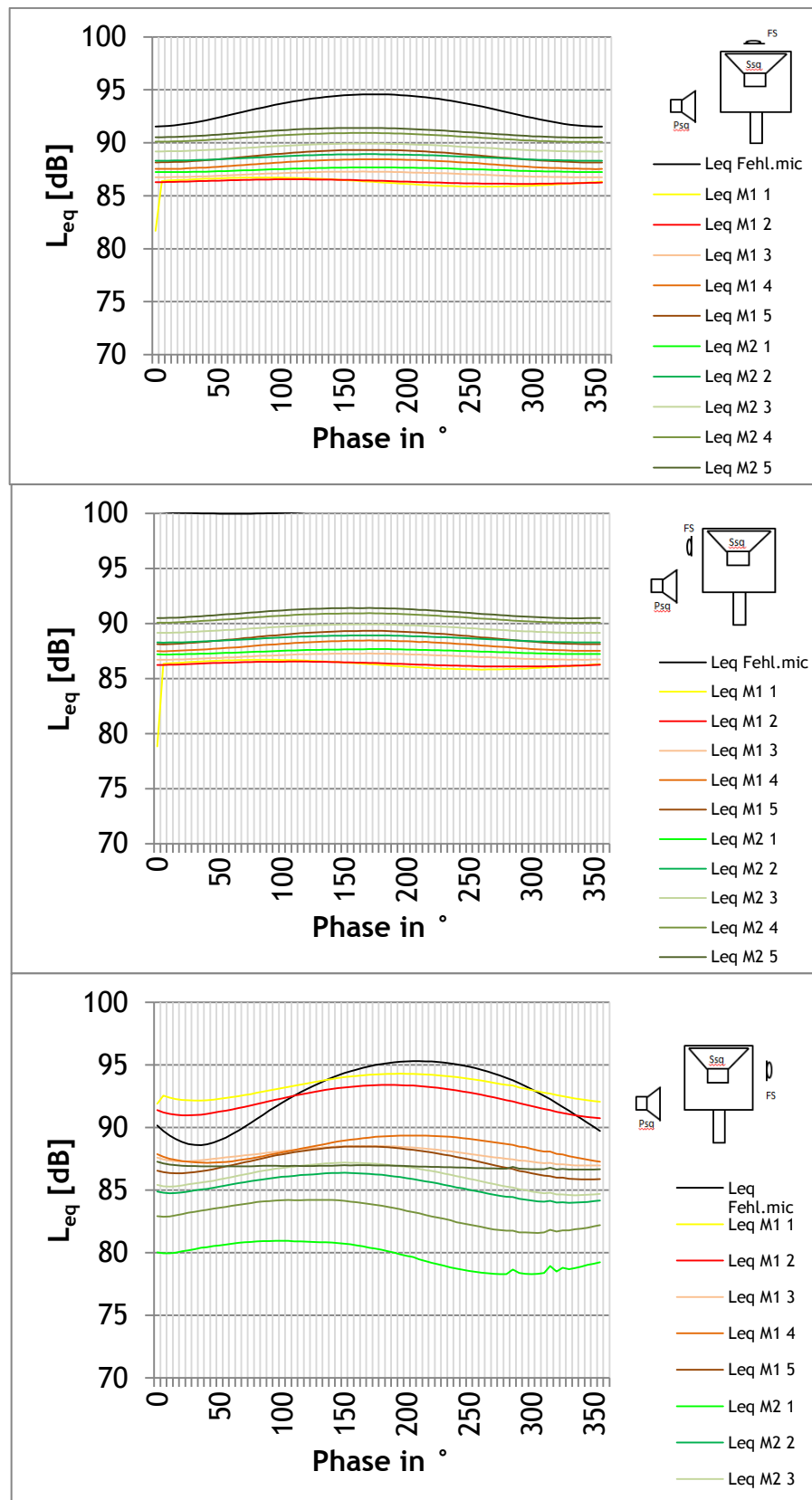


Abbildung A-5 1: Verlauf des Schalldruckpegels an den Messmikrofonen und am Fehlermikrofon während der Phasenänderung des sekundären Schallsignals;  $f=125$  Hz

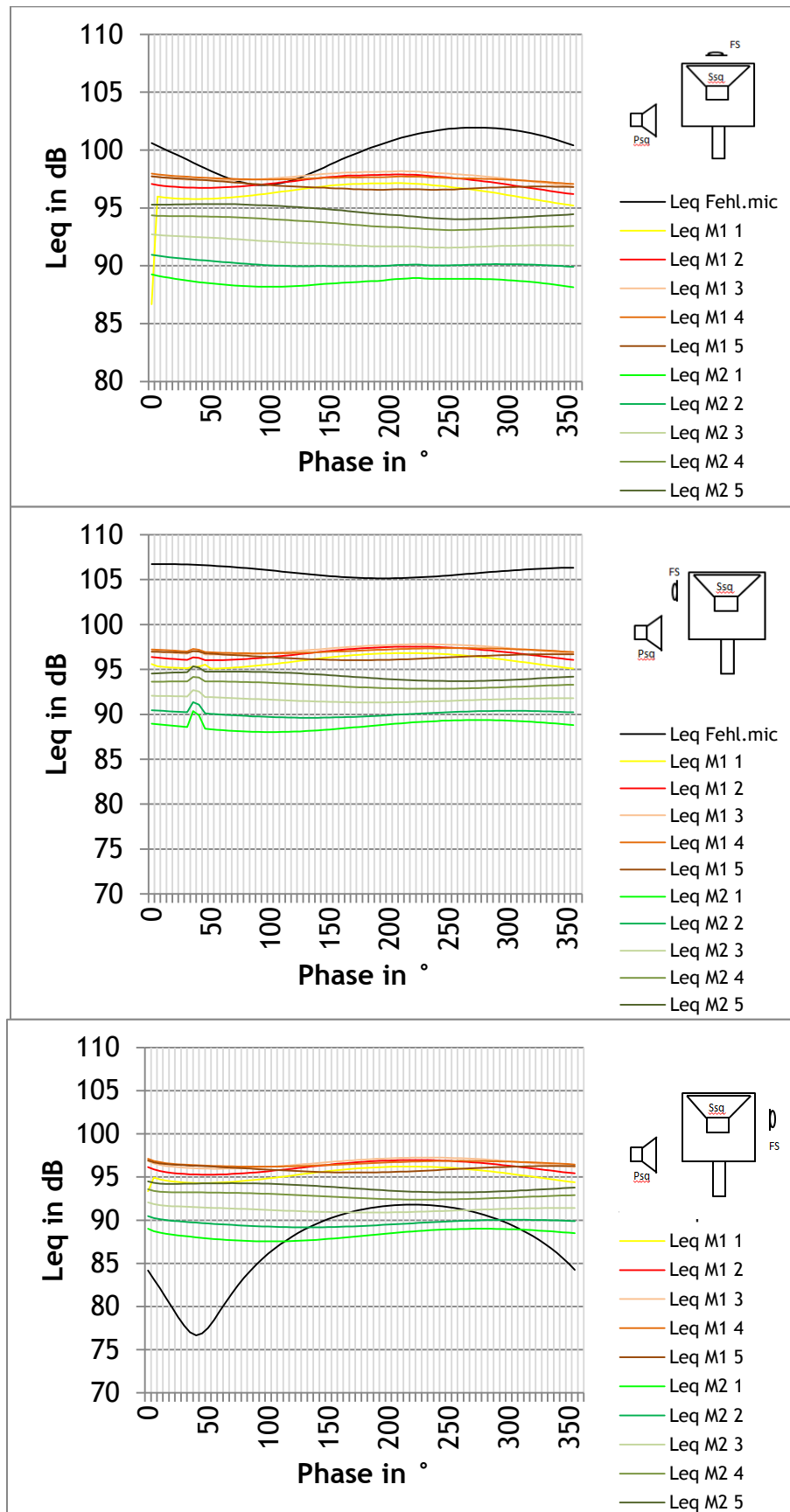


Abbildung A-5 2: Verlauf des Schalldruckpegels an den Messmikrofonen und am Fehlermikrofon während der Phasenänderung des sekundären Schallsignals;  $f=250$  Hz

---

**A-6 Verwendetes Equipment der Messung an der Aktiven Modellärmschutzwand unter der Nutzung kommerziell erhältlicher ANC-Systeme**

ANC-System:	3 ANC-Systeme aus Abgasschalldämpfern
Messmikrofon 1 und 2:	B&K Mikrofon Typ 4190 (Kalibrator B&K Typ 4231)
Analysator:	B&K Typ2144
Generator:	Minirator MR 1
Verstärker:	Stero Amplifier Model PA-940 von Mc Crypt





## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Ort, Datum

Karolin Pansa